



Çok-Bileşenli Sistemlerin Bakım Eniyilemesinde Olasılıklı Grafikselsel Modellerin Geliştirilmesi ve Bunların Çözümleri

PROJE SONUÇ RAPORU

Program Kodu: 1001

Proje No: 117M587

Proje Yürütücüsü
Dr. Öğr. Üyesi Demet ÖZGÜR ÜNLÜAKIN

Araştırmacı:

Prof. Dr. Sezgin Çağlar AKSEZER

Bursiyerler:

Busenur TÜRKALİ

İpek KIVANÇ

Ayşe KARACAÖRENLİ

TEMMUZ 2020

İSTANBUL

Önsöz

“Çok-Bileşenli Sistemlerin Bakım Eniyilemesinde Olasılıklı Grafikselle Modellerin Geliştirilmesi ve Bunların Çözümleri” başlıklı ve 117M587 kodlu bu bilimsel araştırma projesi TÜBİTAK 1001 Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Projelerini Destekleme Programı kapsamında desteklenmiştir. Proje, 2017–2020 yılları arasında, 28 aylık süreçte Işık Üniversitesi Endüstri Mühendisliği Bölümünde yürütülmüştür.

Bu projede bileşenler arası bağımlılıkları olan çok-bileşenli karmaşık sistemlerin reaktif, proaktif ve durum bazlı bakım stratejileri altında bakım eniyileme problemleri olasılıklı grafikselle modeller kullanılarak modellenmiş; bu problemler sonlu zaman ufkunda etkin çözüm yöntemleri ile kabul edilebilir zamanda yaklaşık olarak çözdürülmüş ve ele alınan bakım yöntemlerinin sonuçları karşılaştırılmıştır. Olasılıklı grafikselle model olarak; reaktif ve proaktif bakım stratejileri dinamik Bayesçi ağlar (dynamic Bayesian network, DBN) ile durum bazlı bakım stratejileri ise kısmen gözlemlenebilir Markov karar süreçleri (Partially observable Markov decision process, POMDP) kullanılarak oluşturulmuştur.

Ele alınan üç problem de termik santrallerde bulunan hava-gaz sistemine ait luvo alt sistemi üzerinde denenmiştir. Ayrıca durum bazlı bakım problemi için deneysel daha küçük boyutlu modeller de geliştirilmiştir. Bu raporda, proje kapsamında ele alınan hem gerçek hayat modellerinin hem de deneysel modellerin sonuçları değişik senaryolar altında ayrıntılı olarak verilmiştir.

Bu proje sayesinde bakım yönetiminin giderek önem kazandığı elektrik santralleri gibi üretim sektörlerinde bakım aktivitelerinin daha etkin planlanması sağlanarak bakım maliyetlerinin düşürülmesi konusunda bilgi birikimine katkı sağlanmıştır. Ayrıca DBN’ler ve POMDP’ler gibi olasılıklı grafikselle yöntemlerin bakım eniyilemesinde kullanılması konusunda yeni araştırmacılar yetiştirilmesine imkan verilmiştir. Proje kapsamında yapılan araştırmalar sonucunda üç yüksek lisans tezi ve birçok yayın hazırlanmıştır. Proje kapsamında literatüre kazandırılan çalışmalarda proje desteği vurgulanmış ve kuruma teşekkür edilmiştir.

Proje süresince projenin mali desteğini sağlayan Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumuna teşekkürü borç biliriz.

Dr. Öğr. Üyesi Demet Özgür Ünlüakın

İstanbul, Temmuz 2020

İçindekiler

Önsöz	i
Özet	xii
Abstract	xiii
1 GİRİŞ	1
1.1 Bakım Felsefelerinin Sınıflandırılması	1
1.2 Bakım Planlama Yaklaşımları	3
1.3 Çok Bileşenli Sistemlerin Bakımı	4
1.4 Olasılıklı Grafikselle Modeller	6
1.5 Projenin Motivasyonu ve Amacı	7
1.6 Raporun Organizasyonu	8
2 LİTERATÜR ÖZETİ	11
2.1 DBN'lerin Gelişimi	11
2.2 DBN'lerin Uygulamaları	13
2.3 POMDP'lerin Gelişimi	16
2.4 POMDP'lerin Uygulamaları	18
2.5 Faktörlü POMDP'lerin Uygulamaları	20
2.6 Projenin Literatüre Katkıları	22
3 GEREÇ VE YÖNTEM	24
3.1 Saha Ziyaretleri	24
3.2 Sistemin Belirlenmesi	24
3.2.1 Örnek Termik Santrali	25
3.2.2 Hava-Gaz Sistemi	27
3.2.3 Luvo Sistemi	28
3.3 Luvo DBN Modelinin Kurulması	29

3.3.1	Bileşenlerin ve Durumlarının Belirlenmesi	29
3.3.2	Sistemsel İlişkilerin Belirlenmesi	31
3.3.3	Bakım Eylemlerinin Modellenmesi	32
3.3.4	Olasılık Yapısı	34
3.3.5	Maliyet Yapısı	35
3.4	DBN ile Reaktif Bakım Modellemesi	37
3.4.1	Genel Akış ve Algoritma	38
3.4.2	Önerilen Bakım Yöntemleri	40
3.4.3	Normalleştirme Prosedürü	42
3.5	DBN ile Proaktif Bakım Modellemesi	43
3.5.1	Tabu Prosedürü	45
3.5.2	Sabit Aralıklı Proaktif Bakım (CIPM)	45
3.5.3	Dinamik Aralıklı Proaktif Bakım (DIPM)	46
3.5.4	Eşiğe Dayalı Proaktif Bakım (ThPM)	46
3.5.5	Önerilen Proaktif Bakım Stratejileri için Genel Algoritma	47
3.6	POMDP ile Durum Bazlı Bakım Modellemesi	49
3.6.1	Markov Karar Süreçleri (MDP'ler)	49
3.6.2	Kısmen Gözlemlenebilir Markov Karar Süreçleri (POMDP'ler)	51
3.6.3	İnanç-Durum MDP'leri	53
3.6.4	Faktörlü POMDP'ler	54
3.6.5	POMDP Kesin Çözüm Yaklaşımları	56
3.6.6	POMDP Yaklaşık Çözüm Yaklaşımları	58
4	BULGULAR	63
4.1	Bakım Sayısı Odaklı Luvo Reaktif Bakım Modellemesi Bulguları	65
4.1.1	Bakım Yöntemlerinin Karşılaştırma Sonuçları	65
4.1.2	Bileşenlerin Bakım Tedarik Planlaması	67
4.2	Bakım Maliyeti Odaklı Luvo Reaktif Bakım Modellemesi Bulguları	69
4.2.1	Normalleştirme Prosedürüyle Replikasyon Sonuçları	70
4.2.2	Yöntemlerin Saatlik Duruş Maliyetine Göre Duyarlılık Analizi	73

4.2.3	Dengeleme Analizi: Bakım Maliyeti ve Bakım Sayısı	74
4.2.4	Sayı Bazlı ve Maliyet Bazlı Yöntemlerin Bileşen Seviyesinde Analizi	75
4.3	Luvo Proaktif Bakım Modellemesi Bulguları	77
4.3.1	Bağımsız Motor Gruplarına Dayalı Senaryolar	78
4.3.2	Bağımlı Paralel Motor Gruplarına Dayalı Senaryolar	81
4.3.3	En İyi Parametreler Kullanılarak Proaktif Bakım Stratejilerinin Karşılaştırılması	85
4.3.4	Tabu Prosedürünün Kullanılmasının Gerekçesi	85
4.3.5	Bileşenlerin Bakım Sayısı ve Bakım Maliyeti Dağılımı	87
4.4	POMDP Çözücülerinin Karşılaştırmaları	88
4.4.1	Deneylerin Kurgusu	88
4.4.2	POMDP Çözücüleri	90
4.4.3	Genel Bakım Politika Simülasyonu	91
4.4.4	Deneylerin Sonuçları	91
4.4.5	Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi	98
4.5	DeneySEL Bir Sistemin Faktörlü POMDP'lerle Modelleme Bulguları	99
4.5.1	Değişken Yapısı	99
4.5.2	Olasılık Yapısı	100
4.5.3	Maliyet Yapısı	101
4.5.4	Faktörlü POMDP Modelleme	102
4.5.5	Bakım Politika Simülasyonu	104
4.5.6	Önceden Tanımlanmış Politikalar	104
4.5.7	Duyarlılık Analizleri için Deney Tasarımı	105
4.5.8	Minör Bakım Olasılığına Duyarlılık	107
4.5.9	Duruş Maliyetine Duyarlılık	109
4.5.10	Eylem Uzayına Duyarlılık	111
4.5.11	Önceden Tanımlanmış Politikalarla Karşılaştırmalar	114
4.5.12	Benzer Yaşlanma Davranışları Altındaki Karşılaştırmalar	115
4.5.13	Farklı Yaşlanma Davranışları Altındaki Karşılaştırmalar	117
4.6	Tek-hat Luvo Durum Bazlı Bakım Modellemesi Bulguları	119
4.6.1	Sistem Yapısı	119

4.6.2	Eylem Yapısı	121
4.6.3	Maliyet Yapısı	122
4.6.4	Tek-hat Luvo Faktörlü POMDP Modellemesi	122
4.6.5	Önceden Tanımlanmış Politikalarla Karşılaştırmalar	123
4.6.6	Birim Reaktif Duruş Maliyetlerine Duyarlılık	124
4.6.7	Bileşenlerin Maliyetlerine Duyarlılık	125
4.6.8	Kritik Bileşenlere Duyarlılık	127
4.6.9	Harici Değişkenlere Duyarlılık	127
4.6.10	Gözlem Uzayına Duyarlılık	129
4.7	Tek-hat Luvo Sisteminin DBN ve POMDP bazlı Bakım Politikalarının Karşılaştırılması	129
5	TARTIŞMA VE SONUÇLAR	132
5.1	Katkılar	135
5.2	Çıktılar	136
5.3	Öneriler	137
EKLER		138
A	Proje kapsamında yayımlanmış eserler	138
B	Luvo DBN Modeli Olasılıkları	141
B.1	Luvo DBN Modeli Başlangıç Olasılıkları	141
B.2	Luvo DBN Modeli Geçiş Olasılıkları	142
B.3	Luvo DBN Modeli Koşullu Olasılıkları	145
C	DeneySEL POMDP Modelinin Olasılıkları	147
D	Tek-hat Luvo POMDP Modeli Olasılıkları	148
D.1	Tek-hat Luvo POMDP Modeli Geçiş Olasılıkları	148
D.2	Tek-hat Luvo POMDP Modeli Koşullu Olasılıkları	150
D.3	Tek-hat Luvo POMDP Modeli Gözlem Olasılıkları	151
KAYNAKÇA		153

Şekiller Listesi

1	Bakım felsefeleri	2
2	Modelin kurulma aşamaları	25
3	Örnek bir termik santralin genel işleyişi	26
4	Termik santral sistemleri	26
5	Hava gaz sistemi	27
6	Luvonun 3-boyutlu görünümü (POWER Magazine, 2020)	28
7	Luvo sistemi DBN modeli	30
8	Eylem düğümleri eklendikten sonra oluşan Luvo sistemi DBN Modeli	33
9	Reaktif bakım stratejisinin karar verme akışı	39
10	Proaktif bakım stratejisinin karar verme akışı	44
11	Bir karar vericinin MDP modelinde çevre ile etkileşimi	50
12	Tipik bir MDP modeli	50
13	Bir karar vericinin POMDP modelinde çevre ile etkileşimi	52
14	Tipik bir POMDP modeli	52
15	Düz ve Faktörlü POMDP için iki zaman dilimli gösterim	55
16	Kesin POMDP çözüm yaklaşımlarının sınıflandırması	56
17	Yaklaşık POMDP çözüm yaklaşımlarının sınıflandırması	58
18	Bakım sayısına göre yöntemlerin ortalama farkları için güven aralıkları	66
19	Reaktif bakım altında bileşenlerin bakım gereksinimlerinin dağılımı	68
20	Önerilen yöntemlerin karşılaştırmalı kutu grafiği	72
21	Bakım maliyetine göre önerilen yöntemlerin ortalama farkları için güven aralıkları	72
22	Sayı bazlı ve maliyet bazlı yöntemlerin bileşen dağılımları	76
23	Toplam bakım maliyeti	77
24	Toplam bakım sayısı	77
25	Senaryo DM_{R25} için proaktif bakım stratejilerinin grafiksel karşılaştırmaları	79
26	Senaryo DM_{R50} için proaktif bakım stratejilerinin grafiksel karşılaştırmaları	80
27	Senaryo $DM_{R50-2*DS}$ için proaktif bakım stratejilerinin grafiksel karşılaştırmaları	81
28	Senaryo $depDM_{R25}$ için proaktif bakım stratejilerinin grafiksel karşılaştırmaları	82

29	Senaryo dep DM_R50 için proaktif bakım stratejilerinin grafiksel karşılaştırmaları . . .	83
30	Senaryo dep $DM_R50-2*DS$ için proaktif bakım stratejilerinin grafiksel karşılaştırmaları	84
31	thr=0,97'de tabulu ve tabusuz sonuçların kıyaslanması	86
32	DC_R25 'de bileşenlerin bakım sayısı ve bakım maliyeti dağılımları	87
33	POMDP çözücü karşılaştırması için kurulan modeller	89
34	POMDP çözücüleri ile genel bakım politika simülasyonu	92
35	İki zaman dilimi için deneysel faktörlü POMDP modeli	100
36	SPM'de eylemler ve kombine eylemler için kod örnekleri	104
37	SPM bakım politika simülasyonu	105
38	Önceden tanımlanmış politikaların akışı	106
39	DM 500-6.000 aralığındayken SPM politikasının davranışı	110
40	DM 10.000-100.000 aralığındayken SPM politikasının davranışı	110
41	DM 500-10.000 ve 10.000-100.000 aralığında iken eylem uzayı senaryoları, $p=0,3$	113
42	DM 500-10.000 ve 10.000-100.000 aralığında iken eylem uzayı senaryoları, $p=0,7$	113
43	Benzer yaşlanmalarda DM=1.000 için bakım politikaları	115
44	Benzer yaşlanmalarda DM=7.000 için bakım politikaları	116
45	Benzer yaşlanmalarda DM=70.000 için bakım politikaları	117
46	Farklı yaşlanmalarda DM=1.000 için sonuçlar	118
47	Farklı yaşlanmalarda DM=7.000 için bakım politikaları	118
48	Farklı yaşlanmalarda DM=70.000 için bakım politikaları	119
49	Tek-hat Luvo sisteminin faktörlü POMDP modellemesi	120
50	Farklı birim reaktif DM değerleri altında TÇokDüşük, TBakım ve TBakımPro sayıları	125
51	Bileşenlerin bakım dağılımı	126
52	DM_R25 'te DBN ve POMDP bazlı reaktif bakımların karşılaştırılması	130
53	DM_R25 'te DBN ve POMDP bazlı proaktif bakımların karşılaştırılması	130
54	DM_R50 'te DBN ve POMDP bazlı reaktif bakımların karşılaştırılması	130
55	DM_R50 'te DBN ve POMDP bazlı proaktif bakımların karşılaştırılması	130

Tablolar Listesi

1	Seçilmiş DBN uygulamaları	14
2	POMDP çözücüleri	19
3	Seçilmiş POMDP uygulamaları	21
4	Luvo modeli düğümler ve durum uzayları	31
5	Luvo modeli eylem düğümleri	34
6	Luvo modeli bileşenlerinin en iyi durumda kalma olasılıkları	34
7	Luvo izolasyonunun koşullu olasılıkları	36
8	Luvo modeli bakım maliyetleri ve süreleri	37
9	Notasyonlar	38
10	Önerilen bakım yöntemlerinin kısa özeti	40
11	Reaktif bakım altında bakım sayısına göre yöntemlerin sonuçları	66
12	Reaktif bakım altında bileşenlerin bakım gereksinimleri	67
13	Normalleştirme prosedürü uygulanmadan replikasyon sonuçları	69
14	Önerilen yöntemlerin normalleştirme prosedüründen sonraki replikasyon sonuçları	71
15	DM=25.000 TL iken normalleştirilmiş yöntemlerin karşılaştırma sonuçları	71
16	Normalize edilmiş yöntemlerin birim duruş maliyetine duyarlılık sonuçları	73
17	Normalize edilmiş yöntemlerin bakım sayısına göre istatistiksel sonuçları	75
18	Senaryo DM _R 25 için proaktif bakım stratejilerinin karşılaştırma sonuçları	78
19	Senaryo DM _R 50 için proaktif bakım stratejilerinin karşılaştırma sonuçları	80
20	Senaryo DM _R 50-2*DS için proaktif bakım stratejilerinin karşılaştırma sonuçları	81
21	Senaryo depDM _R 25 için proaktif bakım stratejilerinin karşılaştırma sonuçları	82
22	Senaryo depDM _R 50 için proaktif bakım stratejilerinin karşılaştırma sonuçları	83
23	Senaryo depDM _R 50-2*DS için proaktif bakım stratejilerinin karşılaştırma sonuçları	84
24	En iyi strateji parametrelerinin senaryolar bazında karşılaştırılması	85
25	thr=0,97'de tabulu ve tabusuz replikasyonlarda bileşenlerin dağılımı	87
26	Bileşenlerin geçiş olasılıkları	89
27	P1 ve P2'nin olasılıkları	89
28	P'nin olasılıkları	89

29	O'nun olasılıkları	90
30	POMDP çözücü karşılaştırması için kurulan modellerdeki maliyet yapısı	90
31	Model 1 için çözücülerin bakım politikalarının karşılaştırılması, DM= 5.000	93
32	Model 1 için GH test sonuçları, DM= 5.000	93
33	Model 1 için çözücülerin bakım politikalarının karşılaştırılması, DM= 10.000	93
34	Model 1 için GH test sonuçları, DM= 10.000	94
35	Model 1 için çözücülerin bakım politikalarının karşılaştırılması, DM= 55.000	94
36	Model 1 için GH test sonuçları, DM= 55.000	94
37	Model 2 için çözücülerin bakım politikalarının karşılaştırılması, DM= 5.000	95
38	Model 2 için GH test sonuçları, DM= 5.000	95
39	Model 2 için çözücülerin bakım politikalarının karşılaştırılması, DM= 10.000	95
40	Model 2 için GH test sonuçları, DM= 10.000	95
41	Model 3 için çözücülerin bakım politikalarının karşılaştırılması, DM= 5.000	96
42	Model 3 için GH test sonuçları, DM= 5.000	96
43	Model 3 için çözücülerin bakım politikalarının karşılaştırılması, DM= 10.000	97
44	Model 3 için GH test sonuçları, DM= 10.000	97
45	Model 4 için çözücülerin bakım politikalarının karşılaştırılması, DM= 5.000	97
46	Model 4 için GH test sonuçları, DM= 5.000	97
47	Model 4 için çözücülerin bakım politikalarının karşılaştırılması, DM= 10.000	98
48	Model 4 için GH test sonuçları, DM= 10.000	98
49	DeneySEL faktörlü POMDP modelinin bakım maliyetleri	102
50	SPM için deneySEL tasarım	107
51	Önceden tanımlanmış politikalar için deneySEL tasarım	107
52	Farklı DM değerlerinde duyarlılık analizi, p=0,3	108
53	Farklı DM değerlerinde duyarlılık analizi, p=0,5	108
54	Farklı DM değerlerinde duyarlılık analizi, p=0,7	108
55	Sınırlandırılmış eylem uzayı için farklı DM değerleri altında duyarlılık analizi	111
56	Genişletilmiş eylem uzayı için farklı DM değerleri altında duyarlılık analizi, p=0,3	112
57	Genişletilmiş eylem uzayı için farklı DM değerleri altında duyarlılık analizi, p=0,7	112
58	Benzer yaşlanmalarda DM=1.000 için sonuçlar	115

59	Benzer yaşlanmalarda DM=7.000 için sonuçlar	116
60	Benzer yaşlanmalarda DM=70.000 için sonuçlar	117
61	Farklı yaşlanmalarda DM=1.000 için bakım politikaları	118
62	Farklı yaşlanmalarda DM=7.000 için sonuçlar	118
63	Farklı yaşlanmalarda DM=70.000 için sonuçlar	119
64	Tek-hat Luvo sistemin düğümler ve durum uzayları	121
65	Tek-hat Luvo POMDP modelindeki eylem düğümleri	121
66	Tek-hat Luvo sisteminin bakım maliyetleri	122
67	DM=25.000 olduğunda önceden tanımlanmış politikalarla karşılaştırma	124
68	Farklı birim Reaktif DM değerleri altında duyarlılık analizi	125
69	Bileşenlerin maliyetlerine duyarlılık	126
70	Kritik bileşenlere duyarlılık	127
71	Farklı kömür kalitesi olasılıkları ile duyarlılık analizi	127
72	Farklı cürufanma olasılıkları ile duyarlılık analizi	128
73	Peteklerin bakım süresi ile duyarlılık analizi	128
74	Farklı gözlem uzayları için duyarlılık analizi	129
75	Rulman başlangıç olasılıkları	141
76	Sargı-İzolasyon başlangıç olasılıkları	141
77	Mil-Rotor başlangıç olasılıkları	141
78	Redüktör başlangıç olasılıkları	141
79	Luvo İzolasyonu başlangıç olasılıkları	141
80	Petek başlangıç olasılıkları	142
81	Kömür kalitesi başlangıç olasılıkları	142
82	Cürufanma başlangıç olasılıkları	142
83	Rulman geçiş olasılıkları	142
84	Sargı-İzolasyon geçiş olasılıkları	143
85	Mil-Rotor geçiş olasılıkları	143
86	Redüktör geçiş olasılıkları	143
87	Luvo İzolasyonu geçiş olasılıkları	144
88	Petekler geçiş olasılıkları	144

89	Rotor Dönüşü koşullu olasılıkları	145
90	Redüktör koşullu olasılıkları	145
91	Luvo Dönüşü koşullu olasılıkları	145
92	Luvo Çıkış Sıcaklığı koşullu olasılıkları	146
93	Ölçülen Luvo Sıcaklığı koşullu olasılıkları	146
94	C1 ve C3'ün geçiş olasılıkları	147
95	C2 ve C4'ün geçiş olasılıkları	147
96	P1 ve P2'nin koşullu olasılıkları	147
97	P3'ün koşullu olasılıkları	147
98	O1'in koşullu olasılıkları	148
99	Rulman geçiş olasılıkları	148
100	Sargı-İzolasyon geçiş olasılıkları	148
101	Mil-Rotor geçiş olasılıkları	149
102	Luvo İzolasyonu geçiş olasılıkları	149
103	Petekler geçiş olasılıkları	149
104	Rotor Dönüşü koşullu olasılıkları	150
105	Redüktör koşullu olasılıkları	150
106	Redüktör Dönüşü koşullu olasılıkları	150
107	Luvo Dönüşü koşullu olasılıkları	150
108	Cürüflanma koşullu olasılıkları	151
109	Luvo Çıkış Sıcaklığı koşullu olasılıkları	151
110	Luvo Çıkış Performansının gözlem olasılıkları	151
111	Vibrasyonun gözlem olasılıkları	152

Özet

Endüstrinin gelişmesiyle sistemlerin karmaşıklığı ve buna bağlı olarak da işletmelerin bakım giderleri artmıştır. Bunun sonucunda günümüzde bakım faaliyetlerinin etkin planlanması ve yönetilmesi büyük önem kazanmıştır. Arıza ya da hata yüzünden gerçekleşen plansız makine duruşları hemen hemen her sektörde çok ciddi sonuçlar doğurabilmektedir. Bu projenin amacı bileşenleri arasında çeşitli bağımlılıkları olan kısmen gözlemlenebilir karmaşık çok-bileşenli sistemlerin bakım eniyilemesinde olasılıklı grafiksel modellerin kullanımını keşfetmek, bu tarz problemleri temsil eden bir gerçek-hayat sistemi üstünden konuyu ele alıp bu sistem için DBN ve POMDP modelleri geliştirmek ve bu modeller yardımıyla etkin bakım politikaları oluşturmaktır.

Elektrik santralleri, birbirleriyle etkileşimli bileşenlerden oluşan karmaşık sistemlere sahiptir. Beklenmeyen bir arıza çok ciddi maliyetlere neden olacağından dolayı bakım eniyilemesi, bu sektör için çok kritiktir. Elektrik santrallerindeki çok-bileşenli sistemlerin bakım eniyilemesi, bildiğimiz kadarıyla, daha önceden çalışılmamıştır. Çok-bileşenli sistemlerin bakım eniyileme problemi de, henüz literatürde az çalışılmış olup tek-bileşenli sistemlerin bakım eniyilemesinden daha zordur.

Bu çalışmada termik santrallerdeki çok-bileşenli kritik sistemlerden biri olan dönerli hava ısıtıcısı, Luvo sistemi, için DBN ve POMDP'leri kullanarak değişik bakım stratejileriyle politikalar elde edilmiştir. DBN'ler karmaşık sistemsel ilişkilerin ve zamansal değişimlerin modellenmesi ile olasılık çıkarımları konularında çok başarılı olup eniyileme yapmazlar. Ancak DBN bazlı geliştirilen sezgiseller eniyileme problemlerinde kullanılabilirler. Diğer yandan POMDP'ler sıralı karar problemlerinde çok başarılı olup eniyileme yaparlar. Ancak POMDP'lerin "boyutluluk" ve "geçmiş" problemleri olduğundan küçük boyutlu problemler dışında en iyi sonucu bulmakta zorlanırlar. Böyle durumlarda, yaklaşık algoritmaları kullanarak yaklaşık politikalar elde edilse de ele aldıkları problemlerdeki ilişkiler karmaşıklaştıkça ve değişken ile durum sayıları arttıkça bu politikaların çözüm kaliteleri düşmektedir. Proje kapsamında oluşturulan farklı zorluk seviyesinde iki varyantlı Luvo bakım problemi ve deneysel başka problemler üzerinden DBN ve POMDP bazlı stratejiler kapsamlı senaryolar kurgulanarak bu noktalar ışığında ayrıntılı olarak analiz edilip karşılaştırılmıştır.

Anahtar kelimeler: Bakım eniyilemesi, Kısmen Gözlemlenebilir Markov Karar Süreçleri, Dinamik Bayesçi Ağlar, Elektrik Santralleri

Abstract

Effective planning of maintenance activities have gained great importance. Unplanned machine stops due to malfunction can have serious consequences in almost every industry. This project aims to explore the use of probabilistic graphical models in the maintenance optimization of partially observable multi-component systems with various dependencies, to address the issue through a real-life system that represents such problems, to develop DBN and POMDP models for this system and to create effective maintenance policies with them.

Power plants have complex systems consisting of interactive components. Maintenance optimization is critical for this industry, as an unexpected breakdown will result in serious costs. Maintenance optimization of multi-component systems in power plants, to the best of our knowledge, has not been studied before. The maintenance optimization problem of multi-component systems is also less studied due to its difficulty compared to single-component systems.

In this study, policies have been achieved by various maintenance strategies using DBNs and POMDPs for the regenerative air heater, the RAH system, which is one of the critical multi-component systems in power plants. DBNs are very successful in modeling complex relationships and temporal changes, and in probability inferences, but they do not perform optimization. However, heuristics based on DBNs can be used in optimization problems. On the other hand, POMDPs are very successful in sequential decision problems, and they do optimization. However, since POMDPs have “dimension” and “history” problems, they have difficulties to find the best solution, except for small size problems. Although approximate policies are obtained by using approximate algorithms, the quality of these policies decreases as the number of variables and states increases. The DBN and POMDP based strategies have been analyzed and compared in details in the light of these points, by constructing comprehensive scenarios, through two variants of the Luvu maintenance problem and other experimental problems.

Keywords: Maintenance Optimization, Partially Observable Markov Decision Processes, Dynamic Bayesian Networks, Power Plants

1 GİRİŞ

Bakım eniyilemesi ve bakım stratejisi seçimi, çok bileşenli karmaşık sistemlerde maliyet eniyilemesinde önemli bir rol oynar. İmalat sektöründe kullanılan makine, ekipman, araç gibi her türlü sistemin bir yaşam döngüsü vardır ve bu sistemlerin yaşam döngüleri boyunca bakımlarının yapılması gerekir. Teknoloji geliştikçe sistemler, gelişen otomasyon teknolojileri ve inovasyonlarla birlikte, daha karmaşıklaşırlar, bu da daha yüksek maliyetlere sebep olur. Artan bakım maliyetleri ile başa çıkmak verimli ve etkili bakım planlaması gerektirir. Bu nedenle, etkili bakım stratejilerinin geliştirilmesinin ve kullanımının önemi artar.

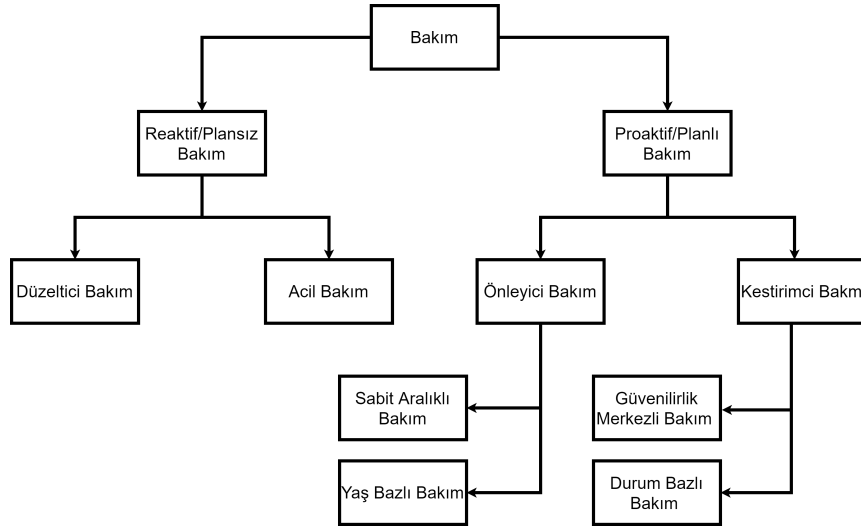
1.1 Bakım Felsefelerinin Sınıflandırılması

Kothamasu vd. (2006) sistem sağlığı izleme ve tahmini konusunda mevcut paradigma ve uygulamaları tartıştığı çalışmasında bakım felsefelerini sınıflandırmıştır. Bu çalışmadan esinlenerek bakım felsefeleri Şekil 1'deki gibi sınıflandırılabilir. Bakım faaliyetleri, temelde reaktif ve proaktif olmak üzere ikiye ayrılır. Reaktif veya plansız bakımlarda, bakım aktivitesi arıza, hata veya durma gerçekleşikten sonra yapılır. Kurulu teçhizatın asgari olduğu ve herhangi bir makinanın güvenilirliğine tamamen bağımlı olmayan tesisler için uygundur (Eisemann, 1998). Ayrıca hata hızının düşük olduğu ve hatanın ciddi maliyet veya güvenlik sonuçlarına yol açmayacağı sistemlerde de kullanımı uygundur.

Reaktif bakım, düzeltici bakım (corrective maintenance) ve acil bakım (emergency maintenance) olmak üzere ikiye ayrılır. Düzeltici bakım, sistemde bir arıza meydana geldikten sonra arızayı giderip sistemi fonksiyonlarını yapabilir hale getirmek için yapılan aktivitedir (Scheut ve Krajewski, 1994). Acil bakım, ciddi sonuçları önlemek için hemen yapılması gereken bakım aktiviteleridir (Ma vd., 2003).

Diğer yandan proaktif veya planlı bakımlarda cihazın arızalanması beklenmeksizin bakım aktiviteleri planlanır. Proaktif bakımlar önleyici bakım (preventive maintenance) ve kestirimci bakım (predictive maintenance) olmak üzere ikiye ayrılır. Önleyici bakımda sistemin bakım faaliyetleri, arıza veya performans düşüş olasılıklarını azaltmak için önceden belirlenmiş aralıklarda gerçekleştirilir.

Önleyici bakım, temel olarak sabit zaman aralıklı bakım (constant interval maintenance) (Price vd., 2000) ve yaş bazlı bakım (age based maintenance) (Huynh vd., 2012) olmak üzere ikiye ayrılır.



Şekil 1. Bakım felsefeleri

Bunlardan ilki önceden belirlenmiş zaman aralıkları ile tekrarlanan, örneğin haftada bir veya ayda bir gibi, takvime bağlı bakımdır. Takvimde belirlenmiş bu zamanların dışında bileşen bozulursa ayrıca düzeltici bakım da yapılır. İkincisinde ise bileşenin yaşı baz alınır. Cihaz, belli bir t yaşına varmadan bozulursa, düzeltici bakım faaliyeti yapılır ve bir sonraki bakım yine t zaman sonrasına planlanır. Bu şekilde bakım için planlanan zaman aralıklarının sayısı sabit zaman aralıklı bakıma göre azalmış olur.

Kestirimci bakım, önleyici bakımdan arıza veya bozulma olmadan yapılan bakım faaliyetlerinin çizelgelenmesi noktasında farklılaşır. Önleyici bakımda, bakım faaliyetleri sabit çizelgelerde gerçekleşirken kestirimci bakımda uyarlamalı (adaptive) olarak belirlenir. Kestirimci bakım, güvenilirlik merkezli bakım (reliability-centered maintenance) ve durum bazlı bakım (condition-based maintenance) olmak üzere ikiye ayrılır. Güvenilirlik merkezli bakım (Moubray, 2001), ekipmanın işlevsel kabiliyetini gerçekleştirmek, onarmak ve bakımını yapmak adına uygun maliyetli bakım planları ve değerlendirme ölçütleri geliştirmek için kullanılan bir tekniktir. Temel amacı, sistemin en önemli işlevleri üzerinde odaklanarak bu işlevlerin istenildiği gibi yerine getirilmesine yönelik uygun önleyici bakım işlerini planlayarak bakım maliyetini düşürmektir. Durum bazlı bakım (Tsang, 1995; Prajapati vd., 2012), bakım kararlarının sistemin ve/veya bileşenlerinin durumlarını gözleyerek belirlendiği karar verme stratejisidir. Sistemin durumu, sürekli izlenen ve o sisteme veya uygulamaya özel parametrelerle ölçümlendirilir. Diğer bir deyişle, durum bazlı bakım, cihazın üzerinde ölçülen değerlere veya ürettiği ürünlerde yapılan ölçümlere göre karar verilen bakım yapma stratejisidir. Örneğin vibrasyon değeri, bir noktadan ölçülen

elektriksel değerler gibi ölçümlerin belirlenen bir eşik değerinin altında veya üstünde olmasına göre bakım faaliyetleri kararı alınır. Sriskandarajah vd. (1998) hem durum bazlı hem de kestirimci bakım politikalarını içeren kapsamlı literatür araştırması yapmıştır.

1.2 Bakım Planlama Yaklaşımları

Papakonstantinou ve Shinozuka (2014), zamanla bozulan inşaat altyapısına ait bakım planlama problemlerine ait yaklaşımları beş kategoride inceler. Bu çalışmadan esinlenerek kestirimci bakım felsefeleri için bakım planlama yaklaşımlarını da beş kategoride incelemek mümkündür:

- İlk kategori, önceden tanımlanmış çeşitli politikaların simülasyonuna dayalı metodları içermektedir. Engelund ve Sorensen (1998)'e ait çalışma bu yaklaşıma örnek olarak verilebilir. Önceden belirlenmiş politikalar bakım problemi üzerinde simüle edilir ve ele alınan amaç fonksiyonuna göre (mesela maliyet en küçüklemesi gibi) en iyi performansı veren politika bakım politikası olarak seçilir. Seçilen politika her ne kadar önceden belirlenmiş diğer politikalarından daha iyi olsa da uygulanabilir en iyi (optimum) politika olma ihtimali zordur.
- İkinci kategoride önceden belirlenmiş güvenilirlik veya risk eşik değeri (threshold) kullanan yaklaşımlar bulunmaktadır. Deodatis vd. (1992) ve Ito vd. (1992) Bayes ağları kullanarak yorgunluğa duyarlı yapılar için güvenilirliklerini belli bir seviyenin üstünde tutacak şekilde periyodik olmayan muayene zamanları belirlemişlerdir. Bu zamanlarda yorgunluk çatlağı teşhis edilirse, bileşenin onarılmasını veya yenilenmesini önermişlerdir. Bakım problemlerinde güvenilirlik eşik politikasının kullanılmasına ait bir başka örnek de uçak yapılarının muayene zamanlarının belirlendiği Deodatis vd. (1996)'ne aittir.
- Üçüncü kategori yaklaşımları, ikinci kategorinin bir uzantısı olarak düşünülebilir. Bunlar, varsayılan güvenilirlik eşik politikasının eniyileme teknikleriyle beraber kullanıldığı yaklaşımlardır. Örnek çalışmalar olarak Lin ve Wan (2011) ile Zhu ve Frangopol (2012)'un çalışmaları ile Özgür-Ünlüakın ve Bilgiç (2014) verilebilir. Bu çalışmalarda bakım zamanları, güvenilirlik eşik politikasına göre belirlendikten sonra bakım faaliyetleri eniyileme teknikleri kullanılarak önerilmektedir.
- Dördüncü kategori olarak, sistemin durumlarının (mesela bozulma seviyesi) tam olarak gözlemlendiği (perfect observations) örnekler için sistemin durumlarına ait gerçek hayat verilerini de dikkate alarak bakım faaliyetlerini belirleyen ve durum bazlı eşik politikası uygulayan yaklaşımlar ele alınabilir. Bu yaklaşımlarda problem, sürekli durumlu rassal modeller

(continuous state stochastic models) kullanılarak modellenir. Castanier vd. (2003)'ne ait çalışma, bu kategori için iyi bir örnektir. Tanımlanan hedef fonksiyonu altında her bakım aktivitesi için durum eşik değerleri en iyi (optimum) olarak belirlenir. Bu durum eşikleri, eşikler arası ilgili bakım aktivitesinin yapılmasıyla, bakım politikasını oluşturur. Bu yaklaşımda iki temel sıkıntı olabilmektedir. İlki, sistemin tam olarak gözlemlenebilmesi, bazı problemler için gerçekdışı varsayım olabilmektedir. İkincisi ise her zaman global optimum çözümün bulunamamasıdır.

- Beşinci kategori, rassal kontrol ve optimum sıralı kararlara dayanan modelleri kapsar. Genelde ayrık durum uzayında çalışırlar ve tıpkı dördüncü kategoridekiler gibi gerçek zamanlı verileri kullanarak en iyi bakım faaliyetlerini belirlerler. Temel olarak, problemler Markov karar süreçleri (Markov decision processes-MDP) kullanılarak modellenir. Thompson vd. (1998) ABD'deki köprü yönetim problemini MDP kullanarak modellemişlerdir. Bu çalışma MDP'lerin başarıyla uygulandığı gerçek hayat problemlerine örnektir. MDP'ler, sistem durumlarının tam gözlemlenemediği problemleri de kapsayacak şekilde, kısmen gözlemlenebilir Markov karar süreçlerine (partially observable MDP-POMDP) genişletilebilir ve bu en geniş haliyle belirsiz sistem durumlarını ve bunlara ilişkin maliyetleri de baz alarak optimum politikalar planlarlar. Böylece POMDP'ler, politika arama uzayına önceden varsayılan herhangi bir kısıt (mesela asgari güvenilirlik eşik değeri, periyodik muayene, vb.) eklemek yerine modelin en iyi bakım politikasını bulmasına olanak sağlar. Örnek olarak Ellis vd. (1995) ve Corotis vd. (2005)'nin çalışmaları verilebilir. POMDP'ler periyodik olarak sağlıkları izlenen ve toplanan verilere göre en uygun bakım aktivitelerinin yapılması istenen sistemler için çok güçlü modelleme imkanı verse de, POMDP modellerinin optimum çözümü ancak küçük boyutlu problemler için mümkündür (Papadimitriou ve Tsitsiklis, 1987). Karmaşık gerçek hayat problemlerini çözmek için yaklaşık çözüm algoritmaları geliştirilmektedir. Son zamanlarda özellikle robotik alanında kullanılmak üzere POMDP çözümlerinde önemli gelişmeler olmuştur

1.3 Çok Bileşenli Sistemlerin Bakımı

Sistemde birbirini etkileyen bileşen sayısı arttıkça sistem karmaşıklaşmakta ve bakım eniyilemesi probleminin çözümü zorlaşmaktadır. Nicolai ve Dekker (2008), bileşenler arasında olabilecek bağımlılığı rassal, yapısal ve ekonomik olmak üzere üç çeşide ayırır.

- Rassal bağımlılık: Bir bileşenin bozulmasının diğer bileşenlerin yaşam zaman dağılımları (lifetime distribution) üzerine etkisini dikkate alır. Etki durumuna göre Tip I arıza etkileşimi

(Type I failure interaction) ve Tip II arıza etkileşimi diye ikiye ayrılır. Tip I arıza etkileşiminde bir bileşenin arızalanması diğer bileşenlerin de belli bir olasılıkta arızalanmasına yol açar. Tip II arıza etkileşiminde ise bir bileşenin arızalanması diğer bir ya da daha fazla bileşenin arıza hızını (failure rate) etkiler ya da onlar üzerinde rassal boyutlu hasara (şoklara) neden olur. Arıza etkileşimini modellemek karışık olduğundan literatürdeki çalışmalar genelde iki-bileşenli sistemler üzerinedir. Tip I arıza etkileşimi üzerine yapılan çalışmalar; Murthy ve Nguyen (1985); Sheu ve Liou (1992); Scarf ve Dears (1998); Scarf ve Dears (2003) (aynı zamanda ekonomik bağımlılığı da dikkate almışlardır) ve Jhang ve Sheu (2000)'ye aittir. Diğer taraftan Tip II arıza etkileşimi konusunda Satow ve Osaki (2003) şok hasar modelini kullanırken, Zequeira ve Berenguer (2005); Lai ve Chen (2006) ve Barros vd. (2006) arıza hız modelini kullanmışlardır.

- Yapısal bağımlılık: Arızalanmış bileşenlerin yenilenmesinden veya onarılmasından önce diğer bazı çalışan bileşenlerin yenilenmesini gerektiren bağımlılıktır. Aralarında yapısal bağımlılığı olan bileşenler birbirlerinden bağımsız olarak onarım göremezler. Dolayısıyla bu arıza bağımlılığı değildir, onarım bağımlılığıdır. Sasieni (1956)'nin çalışması, yapısal bağımlılığı gündeme getiren öncül bir çalışmadır. Bu konuda başka bir çalışma da yol bakım problemini ele alan Dekker vd. (1998)'ne aittir.
- Ekonomik bağımlılık: Ferdi bakımla karşılaştırıldığında bileşenler üzerinde bakımı gruplamanın ya maliyet tasarrufuyla ya da daha yüksek maliyetle sonuçlanmasına sebep olan bağımlılık türüdür. Bakım gruplamanın maliyete etkisine göre üç kategoriye ayrılır: Pozitif ekonomik bağımlılık maliyet tasarrufunu sağlarken, negatif ekonomik bağımlılık maliyet artışına neden olmaktadır. Hem pozitif hem negatif ekonomik bağımlılık ise n-taneden-k-tane sistemlerine karşılık gelmektedir. Seri sistem olan $n=k$ durumunda pozitif ekonomik bağımlılık varken, $n>k$ yani fazlalığın (redundancy) olduğu durumda bir bileşen arızalandığında pozitif ekonomik bağımlılık olurken sistem çalıştığı sürece negatif bağımlılık vardır. n-taneden-k-tane sistemlerinde bakım eniyilemesi yaparken, kesinti maliyetlerinin (downtime costs) hesaplanması bir problemdir (Smith ve Dekker, 1997). Çünkü bir bileşenin arızalanması direk sistem arızasına yol açmaz. Smith ve Dekker (1997), n-taneden-1-tane sistemi (soğuk bekleme – cold standby) için kesinti ve diğer maliyetleri çıkarmıştır.

Yukarıda ayrıntıları verilen bileşenler arasında bulunabilecek bu üç tip bağımlılıktan literatürde en çok çalışılanı ekonomik bağımlılıktır (Shafiee ve Finkelstein, 2015). Literatürde birden çok bağımlılık çeşidini birada ele alan çalışma sayısı çok azdır. Ayrıca matematiksel analizi kolaylaştırmak adına çok-bileşenli sistemlerin bakımıyla ilgili yapılan çalışmalarda hemen hemen

hepsi sonsuz planlama ufku varsayımı altında bakım optimizasyonu yapmışlardır. Bu sayede optimal kontrol parametreleri ve optimal maliyet için analitik ifadeler çıkarmak mümkün olmuştur. Sonlu-ufuk modeli (finite-horizon) kullanılan çalışmalardan makul boyutlu bakım çizelgeleme problemlerinin kesin (exact) yöntemlerle makul sürede çözülebildiği (Grigoriev vd., 2006; Papadakis ve Kleindorfer, 2005) ancak problemin büyüklüğü arttıkça sezgisel yöntemlerin kullanıldığı (Budai vd., 2016; Higgins, 1998; Sriskandarajah vd., 1998) görülmektedir. Şu ana kadar çok-bileşenli sistemlerin bakımı ile ilgili yukarıda bahsi geçen çalışmaların hiçbirinde durum bilgisi, kestirimci bilgi veya kalan faydalı ömrün (remaining useful life-RUL) tahminini kullanan kestirimci bakım modelleri kullanılmamıştır. Son zamanlarda bu tarz çalışmalara rastlanmaya başlanmıştır. Tian ve Liao (2011) bileşenlerinin arasında ekonomik bağımlılık olan çok-bileşenli sistemlerin durum bazlı bakım eniyilemesini çalışmıştır. Bouvard (2011) ve Van (2013) farklı seviyede bağımlılıkları olan çok-bileşenli bir sistem için dinamik bir kestirimci bakım politikası önermiştir. Nguyen vd. (2014, 2015), çok-bileşenli sistemler için tahmin bilgisini kullanarak durum bazlı bakım politikası ile çok seviyeli bir kestirimci bakım politikası geliştirmişlerdir.

1.4 Olasılıklı Grafiksel Modeller

Olasılıksal grafiksel modeller, grafik teorisi ve olasılık teorisini birleştirerek birbirleriyle etkileşime giren çok sayıda rasgele değişkeni modellemek için esnek bir çerçeveye sağlar.

- Bayesçi Ağlar (Bayesian Networks-BN'ler), koşullu olasılık dağılımları kullanılarak sistemin elemanları arasındaki nedensel ilişkileri tanımlamak için kullanılır. BN'ler, değişkenlerin düğümlerle temsil edildiği ve değişkenler arasındaki koşullu ilişkilerin yönlü oklarla temsil edildiği asiklik (acyclic) grafiklerdir (Pearl, 2014). BN'ler iki ana bölümden oluşur: Kalitatif kısım, değişkenler arasındaki olasılıksal bağımlılıkları grafiksel olarak ifade eder ve kantitatif kısım, kalitatif kısımda tanımlanan koşullu ilişkiyi tanımlar. BN'ler özellikle karar teorik sorun giderme problemlerinde sistem bileşenleri arasındaki bağımlılığı açıklamak için kullanılır (Heckerman vd., 1994). Ayrıca, güvenilirlik BN'lerin sıkça kullanıldığı bir başka alandır (Langseth ve Portinale, 2007).
- Dinamik Bayesçi ağlar (Dynamic Bayesian Networks-DBN'ler), aynı değişkeni farklı zaman dilimlerinde modellemek için zaman boyutunu da hesaba katar (Murphy ve Russel, 2002). Bir DBN, her biri rastgele değişkenler arasındaki dinamik davranışı temsil etmek için aynı BN'i içeren bir dizi zaman diliminden oluşur. Zamansal oklar, farklı zaman dilimlerindeki değişkenler arasındaki olasılıksal bağımlılıkları gösterir. Grafiksel yapı, bu

koşullu bağımsızlığı belirlemek için daha kolay bir yol sağlar. Son zamanlarda DBN'ler karar teorik sorun giderme problemleri, güvenilirlik ve bakım alanları için kullanılmaktadır (Weber vd., 2012).

- Markov karar süreçleri (Markov Decision Processes-MDP'ler), sıralı karar verme problemlerini modellemek için bir olasılıksal bir çerçeve sağlar (Bellman, 1957). MDP'ler, Markov zincirlerinin bir dizi eylem ve durum bazlı ödülle genişletilmiş halidir. Bir MDP modelinde, stokastik bir dünyadaki bir karar verici çevredeki durumu girdi olarak gözlemler ve seçilecek eylemi çıktı olarak belirler. Karar verici tarafından gerçekleştirilen eylem, karar vericiye bir ödül verir ve aynı zamanda karar vericinin yeni bir duruma stokastik bir geçişini sağlar.
- Kısmen gözlemlenebilir Markov karar süreçleri (Partially Observable Markov Decision Processes-POMDP'ler), sistemin direkt gözlemlenemediği ancak kısmi bilgiler (gözlemler) ile tahmin edilebildiği genişletilmiş MDP'lerdir. Bu tür sistemlerde, sistem durumu bazı sinyallerle veya ölçümlerle toplanan gözlemlerle tahmin edilebilir (Papakonstantinou ve Shinozuka, 2014a). POMDP'ler robotik, sağlık bilişimi, yapay zeka ve bakım alanlarında (Özgür-Ünlüakın ve Kıvanç, 2019) yaygın olarak kullanılmaktadır.
- Faktörlü POMDP'ler, POMDP'lerin hesaplama karmaşıklığını azaltmak için karar ağaçları (DT) (Boutilier ve Poole, 1996) ve cebirsel karar diyagramları (ADD) (Hansen ve Feng, 2000) gibi veri yapısı gösterimleri yoluyla değişkenlerin temsil edildiği POMDP varyantlarıdır. ADD'ler, olasılık ve fayda (utility) tablolarını daha küçük boyutlarda temsil etmeyi sağlayan koşullu bağımsızlık ve içeriğe özgü bağımsızlık özelliklerine sahiptir (Hoey vd., 1999). Faktörlü POMDP'ler diyalog yönetimi, asistan teknolojiler, insan-robot etkileşimi ve aktif algılama (Hoey vd., 2014) alanlarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Faktörlü POMDP'ler, doğal faktörlü yapısı nedeniyle çok bileşenli sistemlerin bakım problemleri için özellikle uygundur (Özgür-Ünlüakın ve Kıvanç, 2019).

1.5 Projenin Motivasyonu ve Amacı

Bu projede bileşenleri arasında çeşitli bağımlılıkları olan kısmen gözlemlenebilir karmaşık çok-bileşenli sistemlerin bakım eniyilemesi problemi ele alınmıştır. Karmaşık sistemsel ilişkileri tanımlamadaki başarılarından ötürü dinamik Bayesçi ağlar (DBN), optimal veya optimale yakın politikalar sunabildikleri için de kısmen gözlemlenebilir Markov karar süreçleri (POMDP) problemi modellemede ve çözümede kullanılmıştır. POMDP olasılıklı modellerinin kullanımını keşfetmek, bu

tarz problemleri temsil edecek bir gerçek-hayat problemi üstünden konuyu ele alıp bu problem için DBN ve POMDP modelleri geliştirmek ve bu modeller yardımıyla etkin bakım politikaları oluşturmaktır.

Elektrik santralleri yapı olarak birden fazla birbirleriyle etkileşimli bileşenden oluşan karmaşık sistemlere sahiptir. Elektrik santrallerindeki çok-bileşenli sistemlerin bakım eniyilemesi, bildiğimiz kadarıyla, daha önceden çalışılmamıştır. Bu projede, özellikle termik santrallerdeki çok-bileşenli bir sistemin reaktif, proaktif ve durum bazlı bakım felsefeleri altında bakım eniyileme problemleri ele alınacaktır. Bu problemlerin bakım politikaları olasılıklı grafiksel modeller kullanılarak elde edilecektir. Çok-bileşenli sistemlerin bakım eniyileme problemi, henüz literatürde az çalışılmış olup literatürde epeyce işlenmiş olan tek-bileşenli sistemlerin bakım eniyileme probleminden daha zordur. Bileşenler arasında bağımlılık olması durumunda problem daha da zorlaşmaktadır.

1.6 Raporun Organizasyonu

Proje sonuç raporunda hazırlanan aşağıdaki bölümler sırasıyla şunları kapsamaktadır:

- Bölüm 1; proje sonuç raporunun giriş bölümü olup, proje içeriğiyle ilgili konuları ve metodları özetler. Bu bölümde bakım felsefelerinin taksonomisi verilir ve bakım planlama yaklaşımları özellikle kullandıkları modeller açısından sınıflandırılır. Çok-bileşenli sistemlerin bakım problemlerinde bulunan bileşenler arası bağımlılık çeşitleri tartışılır ve son olarak da projede kullanılan olasılıklı grafiksel modellerden dinamik Bayesçi ağlar ve faktörlü kısmen gözlemlenebilir Markov karar süreçleri hakkında özet bilgiler veriler.
- Bölüm 2; DBN'ler, POMDP'ler ve faktörlü POMDP'lerin gelişimi ve bakım ve benzeri alanlardaki uygulama örnekleriyle ilgili ayrıntılı literatür çalışmalarını içermektedir. Ayrıca literatürde bulunan ve POMDP uygulamalarında kullanılan POMDP çözücülerinin ayrıntıları ve kullandıkları algoritmalar da bu bölümde paylaşılmıştır. Yapılan literatür araştırmalarının önemli bir parçası olan durum bazlı bakım modelleme yöntemi olarak kullanılan kısmen gözlemlenebilir Markov karar süreçleri ve bunların faktörlü modelleri için literatürde geliştirilen kesin ve yaklaşık çözüm yaklaşımları ise içerik olarak daha uygun bulunduğundan Bölüm 3'de Gereç ve Yöntem başlığı altında verilmiştir.
- Bölüm 3; projede kullanılan gereç ve yöntemleri, sunulan bakım stratejilerini ve bu stratejiler altında geliştirilen modelleri ve metodları içermektedir. Bu bölüm; termik santrale yapılan saha ziyaretlerinin özetini, projede ele alınan luvo sistemin ayrıntılarını, kurulan DBN

modelini ve önerilen reaktif ve proaktif bakım stratejilerinin detaylarını sunmaktadır. Reaktif bakım modellemesi altında toplam bakım eylemlerinin sayısını azaltmaya yönelik sekiz adet bakım eylemi seçim yöntemi sunulmuştur. Bu yöntemlerin, eylemlerin maliyetlerini de göz önüne alarak proje kapsamında önerilen bir normalleştirme yöntemi ile toplam bakım maliyetini en azlamak için modifiye edilmiş varyantları da geliştirilmiştir. Proaktif bakım modellemesi altında sabit aralıklı, dinamik aralıklı ve güvenilirlik eşiğine dayalı proaktif üç adet bakım stratejisi sunulmuştur. Ayrıca, durum bazlı bakım modelleme stratejisi altında yöntem olarak kullanılan kısmen gözlemlenebilir Markov karar süreçleri ve bunların faktörlü modelleri için literatürde geliştirilen kesin ve yaklaşık çözüm yaklaşımları da bu bölümde verilmiştir.

- Bölüm 4; proje kapsamında çalışılan luvo sisteminin reaktif, proaktif ve durum bazlı bakım modellerinin değişik senaryolar altında sonuçlarını, bunların birbirleriyle karşılaştırmalarını vermektedir. Reaktif bakım problemi, bakım sayısı ve maliyetini en azlamak üzere iki ayrı hedef fonksiyonu baz alınarak sekiz tane bakım eylemi seçim yöntemi kullanılarak çözdürülmüştür. Proaktif bakım problemi; sabit aralıklı, dinamik aralıklı ve güvenilirlik eşiğine dayalı olmak üzere üç strateji altında değişik parametrelerle çalışılmıştır. Bu bölümde ayrıca üç tane POMDP çözücüsünün performansını karşılaştırmak üzere kurulan dört adet deneysel POMDP modelinin bu çözücüler kullanılarak elde edilen çözümlerinin sonuçları ve karşılaştırılmaları verilmiştir. Yine bu bölümde, faktörlü POMDP ile durum bazlı bakım modellemesine pilot çalışma olmak üzere kurulan dört bileşenli bir sistem faktörlü POMDP çözücüsü ile değişik duyarlılık analizleri yapılarak çözdürülmüş ve sonuçları karşılaştırılmıştır. Pilot deneysel çalışmanın tecrübesiyle paralel iki hatlı olan luvo sistemi boyut olarak küçültülerek tek hatlı luvo sistemi olarak faktörlü POMDP kullanılarak modellenmiş, çözdürülmüş ve kritik parametre duyarlılık analizleri yapılmıştır. Son olarak, faktörlü POMDP ile modellenen tek hatlı luvo sisteminin bakım problemi DBN ile modellenmiş ve önerilen reaktif bakım ile en iyi sonuç veren proaktif bakım stratejisi kullanılarak çözdürülmüş ve sonuçları durum bazlı bakım modellemesinininki ile karşılaştırılmıştır.
- Bölüm 5; proje çalışmasının sonuçlarını ve sunulan stratejilerin ve geliştirilen yöntemlerin uygulanabilirliği ile ilgili tartışmaları verirken bu çalışmadan sonra yapılabilecek potansiyel çalışmaları da işaret etmektedir.
- Ekler Bölümü; proje kapsamında üretilen bilimsel yayınların listesini, luvo bakım sisteminin DBN modelindeki olasılık tanımlamalarını, faktörlü POMDP'lerin bakım eniyilemesi konusunda modelleme ve çözme kapasitelerini araştırmak için kurulan deneysel modelin

olasılık tanımlarını ve luvo bakım sisteminin faktörlü POMDP modelindeki olasılık tanımlamalarını vermektedir.

2 LİTERATÜR ÖZETİ

Bu bölümde, proje kapsamında kullanılan olasılıklı grafiksel modellerden dinamik Bayeşçi ağlar ile kısmen gözlemlenebilir Markov karar süreçlerinin gelişimi referanslarla anlatılmış ve DBN, POMDP ile faktörlü POMDP'lerin uygulama alanlarına dair güncel kaynaklar gösterilip özellikle bakım ve benzeri konularda olan çalışmaların detayları paylaşılmıştır. Literatürde en sık kullanılan POMDP çözücülerinin bir özeti de sunulmuştur. Ayrıca proje kapsamında ele alınan çalışmaların literatüre katkısı da bölüm sonunda verilmiştir.

2.1 DBN'lerin Gelişimi

Bakım planlaması çalışmalarında ilk yapılması gereken şey, bakımı yapılacak sistemin bileşenlerini, arıza durumlarını ve bu arıza durumlarını ortaya çıkaracak olan etkenleri belirlemektir. Bu etkenler bileşenlerin kendi yaşlılığından kaynaklanabildiği gibi, başka bileşenlerin durumunun bu bileşen üzerindeki etkisinden de kaynaklanabilmektedir. Bunun için öncelikle bileşenler arasındaki bağımlılıkların iyi bir şekilde ortaya konulması gerekmektedir. Bileşenler arasındaki bağımlılıkları tanımlamak için literatürde sıklıkla kullanılan yöntemler hata ağacı analizi (fault tree analysis), olay ağacı analizi (event tree analysis) ve papyon bağı analizi (bow-tie analysis) yöntemleridir.

Hata ağacı analizi, bir sistemde istenmeyen bir durum meydana geldiğinde bu durumun nedenlerini, alt olayların tümünün Boole mantığı (Boolean logic) ile birleştirilip analiz edilerek ortaya çıkarılmaya çalışıldığı, yukarıdan aşağıya bir tündengeleim başarısızlık analizidir (Ram, 2019). Bu analiz yöntemi esas olarak güvenlik ve güvenilirlik mühendisliğinde sistemlerin hangi durumlarda başarısız olabileceğini anlamak, riski azaltmanın en iyi yollarını belirlemek ve bir güvenlik kazası veya belirli bir fonksiyonel sistem arızasının olma olasılıklarını belirlemek veya hissetmek için kullanılır. Hata ağacı analizi, ilk olarak 1962 yılında Bell Laboratuvarları'nda, H.A. Watson tarafından ABD Hava Kuvvetleri Balistik Sistemler Bölümü sözleşmesi kapsamında Minuteman I Kıtalararası Balistik Füze Fırlatma Kontrol Sistemini değerlendirmek amacıyla bulunmuştur (Watson, 1961). O zamandan beri kullanımı giderek yaygınlaşmış ve genellikle güvenilirlik uzmanları tarafından arıza analizi aracı olarak kullanılmaktadır.

Olay ağacı analizi ise, bir başlatma olayını takiben olası sonuçları tanımlayan ve ölçen mantık modelinin grafiksel bir temsildir ve ileri mantık kullanılarak oluşturuldukları için güvenilirlik değerlendirmesine tümevarımsal bir yaklaşım sağlar (Andrews ve Dunnet, 2000). Olay ağacı ismi

ilk olarak 1970' lerde WASH-1400 nükleer santral güvenlik çalışması sırasında, hata ağaçlarının çok geniş olması nedeniyle alternatif bir yönteme ihtiyaç duyulunca ortaya çıkmıştır (Keller ve Modarres, 2005).

Papyon bağı yöntemi, yüksek riskli senaryolarda nedensel ilişkileri analiz etmek ve göstermek için kullanılabilecek bir risk değerlendirme yöntemidir. Yöntem, adını papyona benzeyen diyagramın şeklinden alır. Bir papyon diyagramının iki önemli fonksiyonu bulunmaktadır: İlki, bir papyon belirli bir tehlike etrafında var olabilecek tüm olası kaza senaryolarının görsel bir özetini verir; ikincisi, kontrol önlemlerini belirleyerek, bir şirketin bu senaryoları kontrol etmek için ne yaptığını gösterir. Bu yönleriyle bu analizin hata ağacı ve olay ağacının bir araya getirilmiş hali olduğu söylenebilir. İlk "gerçek" papyon diyagramlarının Avustralya Queensland Üniversitesi'nde (1979) verilen HAZAN (Hazard Analysis-Tehlike Analizi) ders notlarında görüldüğü söylenir, ancak bu yöntemin nasıl ve ne zaman bulunduğuyla ilgili kesin kaynak tam olarak anlaşılamamıştır (International Civil Aviation Organization, 2020).

Hata ağacı ve olay ağacı yöntemlerinde olaylar arasındaki bağlantılar tanımlanırken sadece iki durumlu karar mekanizması kullanılabilir. Yani olaylar birbirlerine "VE-VEYA (AND-OR)" kapılarıyla bağlanır. Papyon bağı analizi ise olay ağacı ve hata ağacı analizlerinin bir arada kullanılmasıyla ortaya çıkan bir analiz yöntemidir. Bu açıdan bakıldığında bu yöntemler bir bakım problemi kapsamında ele alınacak değişkenler arasındaki bağımlılıkları tanımlamakta kısıtlıdır.

Öte yandan bileşenler arası bağımlılığı tanımlamak için Bayesçi ağlar (Bayesian networks-BNs) kullanışlı bir yöntemdir. Bayesçi ağlar ilk olarak Jude Pearl tarafından 1985 yılında ortaya atılmıştır. Bu ağda, düğümler değişkenleri, iki düğüm arasındaki ok ise, o düğümlerin birbirine olan bağımlılığını gösterir. Bağımlılıkların güçleri koşullu olasılıklarla ölçülür. Bu tür bir ağ, derin nedensel bilgiyi temsil etmek için kullanılabilir ve bağlantılar yalnızca gerçek bilgileri depolamak için değil, aynı zamanda hesaplamalardaki veri akışını yönlendirmek ve etkinleştirmek için de kullanılırsa bir hesaplama mimarisine dönüşür (Pearl, 1985).

Dinamik Bayesçi Ağlar (Dynamic Bayesian Networks-DBN), BN'lerin bir zaman ufku, T , eklenerek genişletilmiş halidir. Bir DBN, BN değişkenlerini ardışık zaman dilimlerinde birbirleriyle ilişkilendiren bir Bayes ağıdır. Buna genellikle İki Zamanlı BN (2TBN) denir, çünkü T 'nin herhangi bir noktasında, bir değişkenin değerinin dahili regresörlerden ve hemen önceki zamandaki ($T - 1$) değerden hesaplanabileceğini söyler. DBN'ler Paul Dagum tarafından 1990'ların başında Stanford Üniversitesi Tıp Bilişimi Bölümünde geliştirilmiştir (Dagum vd., 1992). Dagum ve Dalper (1993), Kalman filtreleri gibi geleneksel doğrusal durum-uzay modellerini, ARMA gibi doğrusal ve normal tahmin modellerini ve gizli Markov modelleri gibi basit bağımlılık modellerini birleştirerek, doğrusal

olmayan ve zamana bağılı alanlarda kullanılmak üzere genel bir olasılıksal gösterim oluşturmayı amaçlamışlardır.

2.2 DBN'lerin Uygulamaları

Dinamik Bayesçi ağlar, literatürde kendilerine birçok alanda yer bulabilmişlerdir ancak en çok kullanıldıkları alanlar öngörü (Hu vd., 2011; Hu vd., 2017; Muller, 2008), hata tespiti (Amin vd., 2019; Codetta vd., 2014; Hu vd., 2015a; Hu vd., 2015b) güvenilirlik (Li vd., 2019; Liu vd., 2015; Salazar vd., 2017), risk analizi (Barua vd., 2016; Chang vd. (2019); Chen vd. (2019) ve güvenlidir (Wu vd., 2015). Tablo 1, DBN'lerin literatürdeki uygulamalarından seçilmiş olanların bir özetini vermektedir.

Muller vd. (2008), proaktif bakımın zamanını iyi ayarlayabilmek için sistemlerdeki bozulmayı dinamik olarak izleyebilen, olasılıksal modellemeye dayanan bir e-bakım yaklaşımı önermişler ve bu yaklaşımı metal bobinler üzerinde deneyimlemişlerdir. Hu vd. (2017)'de sistemdeki koruma katmanları da dikkate alınarak DBN tabanlı bir prognoz yöntemi önerilmektedir. Koruma katmanlarının bileşenler üzerindeki etkisi ve bu etkinin nasıl modellenebileceği gösterilmiştir. Hu vd. (2011), karmaşık bir sistemin güvenilirliğini, performansını ve güvenliğini öngörmek amacıyla DBN ve karınca kolonisi algoritmasını içeren birleşik bir güvenlik prognozu modeli oluşturmuşlardır. Bu model, hataların yayılma yollarını göstermek için DBN ve karınca kolonisi algoritmasını birlikte kullanmaktadır. Vaka çalışması olarak oldukça karmaşık bir yapıya sahip olan gaz türbini kompresör sistemi seçilmiştir.

Codetta-Raiteri ve Portinale (2014), DBN'lerden yararlanarak kısmi gözlemlenebilir sistemlerde de arıza tespiti, tanımlanması, ve düzeltilmesi için kullanılacak olan bir modelleme çerçevesi önermektedir. Çalışmada bu modelleme uzay araçları üzerinden anlatılmaktadır. Hu vd. (2015b), özellikle olası bir arıza durumunda tehlikelerin ortaya çıkabileceği karmaşık endüstriyel sistemlerde arızaların altındaki nedenleri ortaya çıkaracak DBN tabanlı bir yaklaşım önermektedir. Ayrıca çalışmada, parametrelerin ve ilişkilerin doğru bir şekilde modellenebilmesi için tehlike ve çalışabilirlik (HAZOP) analiz yöntemi kullanılmıştır.

Liu vd. (2015), çok bileşenli paralel bir sistem olan denizaltı patlama önleyicilerde DBN'ler kullanılarak genel hata nedenlerinin nasıl bulunabileceğine dair bir yaklaşım önermiştir. Salazar vd. (2017), sistemlerin kontrolünü en üst düzeye çıkarmak ve bu sırada güvenilirliğini de korumak amacıyla aktüatörlerin kullanılmasını dikkate alan bir model öngörülü kontrol yaklaşımı

Tablo 1. Seçilmiş DBN uygulamaları

Makale	Metot	Uygulama Alanı	Konu
Muller vd. (2008)	DBN	Öngörü	Mekanik Sistemler
Hu vd. (2017)	DBN	Öngörü	Enerji Sistemleri
Hu vd. (2011)	DBN	Öngörü	Gaz Türbini
Dabrowski vd. (2016)	DBN	Öngörü	Bankacılık Krizi
Codetta-Raiteri ve Portinale (2014)	DBN	Hata tespiti	Uzay Araçları
Hu vd. (2015b)	DBN	Hata tespiti	Petrokimya Endüstrisi
Amin vd. (2019)	DBN	Hata tespiti	Termik Santral
Hu vd. (2015a)	DBN	Hata tespiti	Petrokimya tesis sistemi
Sandri vd. (2014)	DBN	Hata Tespiti	Sağlık
Marini vd. (2015)	DBN	Hata Tespiti	Sağlık
Li vd. (2019)	DBN	Güvenilirlik	Kontrol Ünitesi
Liu vd. (2015)	DBN	Güvenilirlik	Denizaltı Sistemleri
Salazar vd. (2017)	DBN	Güvenilirlik	İçme Suyu Ağı
Li vd. (2018)	DBN	Güvenilirlik	Kontrol Ünitesi
Chen vd. (2019)	DBN	Risk Analizi	Rezervuar Sistemleri
Chang vd. (2019)	DBN	Risk Analizi	Denizaltı Sistemleri
Barua vd. (2016)	DBN	Risk Analizi	Seviye Kontrolü
Wu vd. (2016)	DBN	Risk Analizi	Deniz Sondajı
Wu vd. (2015)	DBN	Güvenlik	Tünel İnşaatı
Codetta-Raiteri vd. (2012)	DBN	Ardışık Efektler	Güç İzgarası
Hu vd. (2012)	DBN	Bakım	Gaz Türbini Sistemi
Özgür-Ünlüakın ve Bilgiç (2014)	DBN	Bakım	Araba Arıza Teşhis
Nielsen ve Sorensen (2018)	DBN	Bakım	Rüzgar Türbini
Kao vd. (2005)	DBN	Teşhis	Tedarik Zinciri
Li ve Liu (2018)	DBN	Tahmin	Fırtına
Roos vd. (2017)	DBN	Tahmin	Demiryolu Taşımacılığı

önermişlerdir. Güvenilirliklerin ölçülmesinde DBN'ler kullanılmaktadır.

Chang vd. (2019), DBN modellemesini deniz altı kuyu başlarında yorgunluktan kaynaklı hata riskinin dinamik olarak tahmini için kullanan bir yaklaşım önermişlerdir. Barua vd. (2016), kimya endüstrisi gibi tehlike içeren alanlardaki risk hesaplamasının doğru bir şekilde yapılabilmesi için bileşenlerin dinamik olarak değişimlerini de dikkate alan Bayesçi bir ağ modeli yaklaşımı sunmuşlardır. Çalışmada öncelikle dinamik bir hata ağacı analizi oluşturulmuş ve bunun nasıl bir dinamik Bayes ağına dönüştürülebileceği de gösterilmiştir.

Wu vd. (2015), tünel yapımında yollarda oluşan hasarların güvenlik analizi için inşaat

ilerledikçe ortaya çıkan değişiklikleri de dikkate alan dinamik Bayesçi ağ yaklaşımı önermişlerdir. Bu yaklaşım hem geriye hem ileriye dönük çıkarım yapmayı sağlamaktadır.

Hu vd. (2015a); HAZOP, çok düzeyli akış modellemesi (multi-level flow modeling- MFM) ve DBN yöntemlerini bir hata teşhis modeli için birlikte kullanmışlardır. MFM, HAZOP için bir ön çalışma olarak kullanmış, HAZOP sonuçlarına göre de DBN modeli oluşturmuşlardır. Amaç, karmaşık sistemlerde bir kaza meydana gelmeden önce arızaları tespit etmektir. Wu vd. (2016), DBN ve papyon analizini kullanarak tehlikeli olayların koşullu olasılıklarını ve sonuçlarını belirlemek için bir yaklaşım sunmaktadırlar.

Codetta-Raiteri vd. (2012), DBN'lerin birbirine bağımlı dinamik sistemlerde ardışık etkileri modellemek için nasıl kullanılabileceğini gösterirler. Li vd. (2018), Markov sürecindeki durum geçiş ilişkilerini kullanarak bir DBN modeli oluştururlar ve güvenilirlik modellemesi ve analizi için bu yöntemi önerirler.

DBN'lerin kullanıldığı bir başka alan ise bakım problemleridir. Hu vd. (2012), HAZOP analizi ve DBN'leri kullanarak bir gaz türbini kompresör sistemi için fırsatçı bir kestirimci bakım yöntemi sunar. HAZOP yöntemi, sistemi analiz etmek ve öğrenmek için kullanılır ve daha sonra bu bilgilere dayanarak bir DBN modeli oluşturulur. Özgür-Ünlüakın ve Bilgiç (2014), bileşen ve sistemin gözlemlenemediği bir durumda çok-bileşenli bir sistemin bileşenlerinin yenilenmesi için güvenilirlik eşiğine dayalı bir politika önermiştir. Nielsen ve Sorensen (2018), teftişlerin ve bakımların planlanması için birinde gözlemlenen değişkenlerin, diğerinde ise Bayesçi güncellemelerine bağlı olarak yapılan simülasyonların kullanıldığı dinamik Bayesçi ağlara dayalı iki farklı yaklaşım sunmuştur. Bu yaklaşımların karşılaştırmalarını maliyet açısından değerlendirmişlerdir.

Bu alanlara ek olarak sağlık (Marini vd., 2015; Sandri vd., 2014), ekonomi (Dabrowski vd., 2016), tedarik zinciri problemleri (Kao vd., 2005), doğa olaylarının tahmini (M.Li, 2018) ve toplu taşıma hizmetlerinin kullanımı (Roos vd., 2017) gibi günlük yaşamımızda sıkça karşımıza çıkan farklı alanlarda da DBN'ler kullanılmaktadır.

Sandri (2014), yoğun bakımlardaki organ yetmezliği sıralamasını önceden tahmin edebilmek için geçmişteki verilerden yararlanarak bir DBN modeli oluşturmuşlardır. Marini vd. (2015) ise Tip 1 diyabet hastalarının özelliklerine bağlı olarak komplikasyonların nasıl geliştiği DBN'lerle modellemiştir. Dawrovski vd. (2016), Markov olasılık yapısı kullanılarak gelecekte meydana gelebilecek bir bankacılık krizinin olasılığını DBN modellemesi kullanılarak hesaplamıştır. Kao vd. (2005), tedarik zincirinde meydana gelen sorunların nedenleri ve sonuçlarını ortaya çıkarmak için dinamik Bayesçi ağları kullanmayı önermektedir. Li ve Liu (2018), dalgacık analizi ve

DBN'leri bir arada kullanarak fırtınaların yolunun ve yoğunluğunun hesaplanması için bir yaklaşım sunmaktadır. Roos vd. (2017), DBN'lerin Paris metro hattındaki kısa süreli yolcu yoğunluğunu tahmin etmek için kullanılmasına ilişkin bir yöntem önermektedir.

2.3 POMDP'lerin Gelişimi

Bakım eniyilemesi için planlama ve karar verme kritik rol oynamaktadır. Etkili planlama ve karar verme süreci tüm sürecin iyileştirilmesini ve maliyetlerin azaltılmasını sağlar. Karar teorisi, karar vericinin önceliklerine göre nasıl karar vermesi gerektiğini tanımlar. Yöneylem araştırması ve yapay zekanın ortak çalışma alanı olan karar teorik planlama (Dean vd., 1995), belirsizlik altında karar vermeye odaklanmaktadır. Yöneylem araştırması, verilen hedeflere ulaşmada faydalar veya etkinlik açısından en iyi kararların belirlenmesini sağlayan kararların nicel olarak değerlendirilmesi için matematiksel bir temel sağlar. Öte yandan, yapay zekada, karar vericiler çevreleri ile etkileşim kurar ve hedeflerine başarılı bir şekilde ulaşma şanslarını en üst düzeye çıkarmak için çeşitli arama tekniklerini kullanarak kararlar alırlar.

MDP'ler sıralı karar teorik planlamanın modellenmesi için temel bir çerçevedir. Bellman (1957), belirsizlik altında sıralı karar verme sorunlarını çözmek için özyinelemeli bir yöntem olan dinamik programlamayı (DP) geliştirir. Bellman ayrıca bir DP yöntemi olarak değer yineleme algoritmasını (value iteration algorithm) geliştirir. Howard (1960), sonsuz ufuklu problemleri çözmek için ortalama ödül ile politika yineleme (policy iteration) fikrini ortaya koyar.

POMDP, MDP'nin sistem durumlarının eksik bilgiler ile tahmin edildiği özel bir halidir. Karar verici, her karar döneminde sadece gürültülü bilgilere dayanarak eylem setinden bir eylem seçer. Karar verici, en iyi kararı verebilmek için geçmiş gözlemlerini ve kararlarını hatırlamalıdır. Buna "tüm geçmiş" denir, tüm geçmiş zaman içinde genişlediği için işlemek ve saklamak zordur. Aström (1965), inanç durumlarının eniyilik (optimality) kaybı olmadan tüm geçmişi özetlemek için yeterli olduğuna dikkat çeker. Böylece, POMDP'ler, kesikli durum uzayı yerine olasılık değerlerini içeren sürekli uzay aracılığıyla sürekli MDP'nin özel bir örneği olan inanç-durum MDP'leri (belief-state MDPs,) olarak tanımlanabilir (Kaelbling, 1998).

Sondik, doktora çalışmasında (Sondik, 1971) ve ardıl makalesinde (Smallwood ve Sondik, 1973), POMDP'lerle ilgili hesaplama güçlüklerini ele alan ve çözen ilk kişidir. Bu çalışmalarda, sonlu ufuklu POMDP'ler için, elde edilen sürekli inanç durum MDP'sinin, her bir periyotta parçalı doğrusal dışbükey bir değer fonksiyonuna (a piece-wise linear convex value function) sahip olduğu

kanıtlanmıştır. Sondik, ayrıca sonlu ufukta POMDP'ler için optimal politika ve değer fonksiyonu hesaplamak için tek geçişli bir algoritma (one-pass algorithm) geliştirir.

Monahan (1982), POMDP'lerle ilgili teorileri, modelleri ve algoritmaları kapsamlı bir şekilde inceler. Bu çalışmada, POMDP çerçevesinde, kalite kontrol, iç denetim ve makine bakımı gibi alanlarda çok çeşitli modeller tartışılmaktadır. Dahası, bu çalışmada, sonlu ufukta POMDP'ler için optimal politika ve değer fonksiyonunu hesaplamak üzere bir numaralandırma algoritması (enumeration algorithm) önerilmektedir. Bu algoritmanın ana fikri tüm olası vektörleri oluşturmak ve yararsız olanları ortadan kaldırmaktır. Papadimitriou ve Tsitsikis (1987), POMDP'lerin hesaplama karmaşıklığını tartışır. Sonlu POMDP'ler için optimal politika mevcudiyetinin PSPACE-complete bir problem olduğu kanıtlanmıştır.

Cheng (1988), iki yeni kesin algoritma (gevşemiş bölge ve doğrusal destek algoritmaları) geliştirir. Bu algoritmalar Sondik'in fikri üzerine kuruludur; ancak, daha az kısıtlamaları vardır. Littman (1994), indirimli sonlu-ufuk POMDP'lerini değer yinelemesi kullanarak kesin olarak çözmek için şahitlik algoritmasını (witness algorithm) sunar. Cassandra vd. (1997), Monahan'ın numaralandırma algoritmasını ve şahitlik algoritmasını birleştirme fikri ile artımlı budama algoritmasını geliştirir.

Büyük durum uzaylı POMDP'leri kesin algortimalarla çözmek oldukça zordur. Bu sebeple, literatürde yaklaşık çözüm algoritmaları geliştirilmiştir. Bunlar arasında MDP tabanlı sezgisel yöntemler (Cassandra vd., 1996; Littman vd., 1995a), kılavuz tabanlı (grid-based) yöntemler (Bonet, 2002; Brafman, 1997; Drake, 1962; Zhou ve Hansen, 2001), nokta tabanlı (point-based) yöntemler (Pineau vd., 2003; Smith ve Simmons, 2005; Spaan ve Vlassis, 2005), geçmişe dayalı (history-based) yöntemler (Mccallum, 1995) ve politika arama (policy search) yöntemleri (Braziunas ve Boutilier, 2004) bulunmaktadır.

Nokta tabanlı yaklaşımlar, büyük ölçekli POMDP'lerin çözümünde artan bir popülerlik kazanmaktadır. İnanç uzayını örnekleyerek sağladıkları kayda değer ilerleme nedeniyle, nokta tabanlı çözümler yüzlerce durumlu problemleri çözebilir (Kurniawati vd., 2008). Pineau vd. (2003, 2004) sadece sınırlı bir inanç uzayı için değer fonksiyonunu hesaplayan, gerektiğinde ilk inanç durumundan erişilebilen ve sete yeni noktalar ekleyerek devam eden nokta tabanlı bir değer iterasyon (point-based value iteration algorithm - PBVI) algoritması geliştirir. Spaan and Vlassis (2005), PBVI algoritmasına benzeyen Perseus algoritmasını önerir, her iterasyonda tüm inanç noktalarını güncellemek yerine, Perseus, yalnızca iyileştirilmemiş inanç noktalarını günceller. Her seferinde küçük bir inanç alt kümesini güncellediğinden, bu algoritma optimale yakın bir politikaya daha hızlı yaklaşabilir. Smith ve Simmons (2004), inanç noktalarını toplamak için değer

fonksiyonunun üst ve alt sınırlarına dayanan sezgisel tarama kullanan sezgisel arama değer yinelemesini (Heuristic Search Value Iteration) geliştirir. Kurniawati vd. (2008) ise SARSOP (Successive Approximations of the Reachable Space under Optimal Policies) algoritması ile optimal erişilebilir inanç uzayları fikrinden faydalanarak hesaplama verimliliğini artırır.

POMDP'lerin iki önemli sorunu boyutluluk (Kaelbling vd., 1998) ve geçmiştir (Pineau et al., 2004). Boyutluluk sorunu, durum uzayının boyutunun durum sayısı ile üssel büyüdüğü anlamına gelirken geçmiş sorunu, planlama ufkunun artması ile eylem-gözlem geçmişinin sayısının üssel büyümesi demektir. Dolayısıyla, POMDP'ler büyük durum uzaylarına sahip problemleri ele almakta zorlanırlar. Boyutluluk probleminin üstesinden gelmek için, doğal faktörlü yapılara sahip sistemler için faktörlü temsiller (factored representations) önerilmiştir. Klasik bir POMDP temsiliinde, sistem birden fazla durumu olan tek bir düğüm ile temsil edilir. Bununla birlikte, faktörlü POMDP'ler, karar ağaçları (Boutilier ve Poole, 1996) ve cebirsel karar diyagramları (Hansen ve Feng, 2000) gibi veri yapısı gösterimleri yoluyla kompakt bir şekilde temsil edildiğinden, hesaplama karmaşıklığını azaltmak için etkili araçlardır. Poupart [130], Perseus algoritmasının güncellenmiş faktörlü bir versiyonu olan Symbolic Perseus'u geliştirir. Smith ve Simmons (2006), sezgisel arama değer yineleme algoritmasının faktörlü bir versiyonu olan Symbolic HSVI'yi önerir.

Bu çalışmanın 3. iş paketi, faktörlü POMDP'lerle kısmen gözlemlenebilir bozulan bileşenlerden oluşan karmaşık sistemlerin bakım probleminin nasıl formüle edileceğini ve bu sistemler için başarılı bakım stratejilerinin nasıl oluşturulacağını göstermeye odaklanmaktadır. Bu nedenle eldeki bakım modellerini çözebilen hazır POMDP çözücüleri araştırılmıştır. Tablo 2, literatürde en sık kullanılan POMDP çözücülerinin bir özetini sunmaktadır. Tüm çözücüler GNU/Linux ve Apple OS-X ortamlarında derlenebilir.

2.4 POMDP'lerin Uygulamaları

POMDP'ler çok çeşitli gerçek yaşam problemlerinde uygulanmaktadır. Robotik, robotların navigasyonu (Foka ve Trahanias, 2007; Pineau ve Gordon, 2007; Roy vd., 2005; Simmons ve Koenig, 1995), görsel izleme (Darrell ve Pentland, 1996), uyarlanabilir algılama (Hoey ve Little, 2007; Spaaan vd., 2010) ve destek sağlık hizmeti (Boger vd., 2005; Pineau vd., 2003) en yaygın kullanıldıkları uygulama alanlarındandır.

POMDP'lerin bir başka uygulama alanı, kalp hastalıkları (Hauskrecht ve Fraser, 2000), kanser (Maillart vd., 2008), Parkinson hastalığı (Goulionis ve Vozikis, 2009) ve engellilere yardım

Tablo 2. POMDP çözücileri

Çözücü	Yazarı	Kod Dili	Son Bakım	Algoritmalar
POMDP-Solve (Cassandra vd., 2005)	Cassandra T.	C	2015	Sayım Algoritması (Enumeration) İki Geçiş Algoritması (Two Pass) Doğrusal Destek Algoritması (Linear Support Algorithm) Şahitlik Algoritması (Witness) Artımlı Budama (Incremental Pruning)
MADP (Oliehoek vd., 2011)	Oliehoek F. vd.	C++	2017	Sayım Algoritması (Enumeration) Artımlı Budama (Incremental Pruning) Perseus
ZMDP (Smith, 2020)	Smith T.	C++	2009	Odaklanmış Gerçek Zamanlı Dinamik Programlama (Focused Real-Time Dynamic Programming-FRTDP) Geliştirilmiş Sezgisel Arama Değeri İterasyon Algoritması (Improved Heuristic Search Value Iteration Algorithm-HSVI2) Gerçek Zamanlı Dinamik Programlama (Real-Time Dynamic Programming-RTDP) Etiketli Gerçek Zamanlı Dinamik Programlama (Labeled Real-Time Dynamic Programming-LRTDP)
APPL (Due vd., n.d.)	Singapur Ulusal Üniversitesi	C++	2012	APPL Çevrimdışı-SARSOP APPL Çevrimiçi-Belirlenmiş Seyrek Kısmen Gözlemlenebilir Ağaç Algoritması (Determinized Sparse Partially Observable Tree-DESPOT) APPL Sürekli POMDP-Monte Carlo Değeri İterasyonu (Monte Carlo Value Iteration-MCVI)
JULIA POMDP (Egorov vd., 2017)	Stanford Akıllı Sistemler Laboratuvarı	Julia	2018	QMDP Hızlı Bilgilendirilmiş Sınır Algoritması (Fast Informed Bound-FIB) SARSOP Herhangi bir Zamanda Hata Minimizasyon Arama Algoritması (Anytime Error Minimization Search-AEMS) Kısmen Gözlemlenebilir Monte Carlo Planlaması (The Partially Observable Monte Carlo Planning-POMCP) Herhangi bir zamanda Düzenli Belirlenmiş Seyrek Kısmen Gözlemlenebilir Ağaç Algoritması (Anytime Regularized Determinized Sparse Partially Observable Tree-AR-DESPOT) Monte Carlo Değeri İterasyonu (The Monte Carlo Value Iteration-MCVI)
Perseus (Spaan ve Vlassis, 2005)	Spaan M.	Matlab	2005	Perseus
Symbolic Perseus* (Poupart, 2005)	Poupart P.	Matlab Java	2009	Symbolic Perseus

* faktörlü gösterimler kullanır.

(Mihailidis vd., 2008) konularını kapsayan sağlık bilişimidir. Ayrıca, POMDP'lerin envanter kontrolü (Treharne ve Sox, 2002), dinamik fiyatlandırma stratejileri (Aviv ve Pazgal, 2005) ve pazarlama kampanyaları (Rusmevichientong ve Van Roy, 2001) konularında da uygulamaları bulunur.

POMDP'ler, yüksek operasyonel karmaşıklıkları nedeniyle bakım alanında diğer olasılıklı grafiksel yaklaşımlardan daha az yaygındır. Ancak POMDP'ler, işletme maliyetlerini en aza indiren ve makinenin üretim kapasitesini en üst düzeye çıkaran durum bazlı bakım politikaları sunar. White (1976) ve Rosenfield (1976) tarafından yapılan erken teorik çalışmalar bakım problemlerinin POMDP modellemesinde öncüdür. Monahan'ın literatür çalışmasında (Monahan,

1982), POMDP'lerle ilgili model ve algoritmalara genel bir bakış sunulmaktadır. Makine değişimi de bu çalışma kapsamında ele alınır. Bu katkılardan sonra, literatürde, bakım yönetimi için teorik çerçeveler sağlayan makale sayısı (David vd., 1999; Madanat, 1993; Makis ve Jiang, 2003) hızla artar.

Madanat ve Ben-Akiva (1994) otoyol kaldırım ağlarının bakım çizelgeleme problemi için gizli Markov karar sürecini (Latent MDP) benimser. LMDP, MDP'nin ölçüm hataları göz önünde bulundurularak ve görsel incelemelerden elde edilen farklı durumlar dikkate alınarak güncellenmiş bir versiyonudur. Ellis vd. (1995), denetim hataları nedeniyle hasar koşullarının eksik değerlendirilmesi sorununu çözmek için altyapı sistemlerinde yapısal bakım için köprü denetim modeli geliştirir. Aynı yazarlar, bir otoyol köprüsünün bozulma süreçleri olarak yorgunluk ve korozyonu dikkate alan bir model geliştirir (Jiang vd., 2000). Ayrıca, daha sonraki bir çalışmada riske dayalı köprü denetimi bakımı için POMDP modelinin nasıl formüle edileceği de gösterilir (Corotis vd., 2005).

Ivy ve Nembhard (2005), eksik bilgi durumunda, bozulan sistemlerin optimum bakım politikalarını belirlemek için istatistiksel kalite kontrol ve POMDP'yi entegre eder. İstatistiksel kalite kontrol yöntemleri, gerçek dünyayı simüle ederek POMDP için gözlem dağılımlarını tanımlamak için kullanılır. Memarzadeh ve Pozzi (2015), inşaat altyapı sorunları için bilgi toplamak amacıyla POMDP'ye dayalı uyarlanabilir bakım planlaması ve Bilgi Değeri (Value of Information) sezgisellerine dayalı denetim planlaması önermektedir. AIDurgam ve Duffuaa (2013), karar vericinin çok durumlu, çok aşamalı makine bakım sorunu için en iyi bakım eylemini ve hız ayarını değerlendirmesine izin veren politika grafikleri oluşturmak için POMDP modellerini kullanır.

Tablo 3, kullanılan algoritmaya, uygulama alanına ve konusuna göre gruplandırılmış POMDP uygulamalarının bir özetini içerir.

2.5 Faktörlü POMDP'lerin Uygulamaları

Literatürde, özellikle son yıllarda, faktörlü POMDP'lerin kullanıldığı çalışmalar da mevcuttur. POMDP uygulamalarına ek olarak Tablo 3, faktörlü POMDP uygulamalarıyla ilgili referansları da kullanılan algoritmaya, uygulama alanına ve konusuna göre listelemektedir.

Faktörlü POMDP'ler, diyalog sistemlerinin sözlü yönetim modülünü tasarlamak için yaygın olarak kullanılmaktadır. Diyalog sistemlerinde kontrol süreci karmaşıktır, çünkü otomatik konuşma tanıma çok güvenli bir süreç değildir ve konuşmanın durumu bilinmemektedir. Bu nedenle,

Tablo 3. Seçilmiş POMDP uygulamaları

Makale	Metot	Algoritma	Uygulama Alanı	Konu
Ellis ve Corotis (1995)	POMDP	Tek-Geçiş	Bakım	Yapısal Planlama
Reyes vd. (2009)	Faktörlü MDP	SPUDD	Bakım	Enerji Sistemleri
Papakonstantinou ve Shinozuka (2014)	POMDP	Perseus	Bakım	Yapısal Planlama
Sheng ve Feng (2014)	POMDP	Perseus	Bakım	Enerji Sistemleri
Pozzi vd. (2014)	POMDP	SARSOP	Bakım	Rüzgar Çiftlikleri
Memarzadeh ve Pozzi (2016)	POMDP	SARSOP	Bakım	Altyapı Sistemleri
Lin vd. (2016)	POMDP	Tek-Geçiş	Bakım	Enerji Sistemleri
Papakonstantinou ve Memarzadeh (2017)	POMDP	SARSOP Perseus HSVI	Bakım	Yapısal Planlama
Ghandali vd. (2018)	POMDP	Perseus Artırımlı Budama	Bakım	Sürdürülebilirlik
Morato vd. (2018)	POMDP	SARSOP	Bakım	Rüzgar Çiftlikleri
Papakonstantinou vd. (2018)	POMDP	SARSOP Perseus ZMDP	Bakım	Yapısal Planlama
Kim vd. (2008)	Faktörlü POMDP	Symbolic HSVI	Yapay Zeka	Diyalog Sistemleri
Williams vd. (2005)	Faktörlü POMDP	Symbolic Perseus	Yapay Zeka	Diyalog Sistemleri
Müller vd. (2012)	Faktörlü POMDP	Symbolic Perseus	Yapay Zeka	Asistan Teknolojiler
Hoey vd. (2007)	Faktörlü POMDP	Symbolic Perseus	Yapay Zeka	Asistan Teknolojiler
Araya-Lopez vd. (2010)	POMDP	POMDP-Solve	Yapay Zeka	Robotik
Wang vd. (2013)	Faktörlü POMDP	Symbolic Perseus	Ekoloji	Kuş Göçü
Rout vd. (2014)	POMDP	POMDP-Solve	Ekoloji	İstilacı Türler
Erdoğan vd. (2011)	Faktörlü POMDP	Symbolic Perseus	Genetik	Gen Açılımı
Capitan vd. (2011)	Faktörlü POMDP	Symbolic Perseus SARSOP	Robotik	Navigasyon
Küçükyaşıcı vd. (2015)	POMDP	POMDP-Solve	Sağlık	Bireysel Tedavi

faktörlü POMDP'ler aracılığıyla diyalog yönetimi ile ilgili karar verme modelleri kullanılarak çeşitli çalışmalar yapılmaktadır. Bui vd. (2010), tek yuvalı bir navigasyon diyalog sorunu için etkili diyalog sistemlerinin nasıl modelleneceğini ve faktörlü POMDP'leri kullanarak duygusal bir diyalog modelinin nasıl geliştirileceğini gösterir. Williams vd. (2005), tren bileti satın almak için sözlü

diyalog yönetimi için faktörlü bir gösterim sunar. Young (2006), POMDP'lerin uçuş rezervasyonu için sözlü iletişim sistemlerindeki mevcut belirsizliğin modellenmesi için nasıl matematiksel bir yapı sağlayabileceğini açıklar.

Asistan teknoloji ve insan-robot etkileşim problemi son zamanlarda ilgi çekici bir konu haline gelmiştir. Asistan teknolojiler yaşlı bir yetişkine ses veya video kullanarak rehberlik ederek sorunu çözer. Hoey vd. (2014), Alzheimer hastalarına faktörlü POMDP'ler kullanarak rehberlik sağlar. Jean-Baptiste vd. (2015) günlük yaşam aktiviteleri sırasında eylem planlaması ve insan hatasının tanımlanması için bir POMDP modeli önermektedir. Taha vd. (2011), engelli bir kişinin robotik tekerlekli sandalye ile etkileşimini modellemek için POMDP'leri benimsemiştir.

2.6 Projenin Literatüre Katkıları

Bölüm 1'de özetlenen proje kapsamına ve bu bölümde ayrıntıları verilen literatür araştırmasına dayanarak literatürdeki eksiklikler ve projenin bu konularda literatüre katkıları şu şekilde özetlenebilir:

- Çok-bileşenli gerçek-hayat sistemlerinin bakım eniyilemesi problemi literatürde, kısıtlı olmakla beraber, ancak son zamanlarda çalışılmaya başlanmıştır. Projede termik santrallerdeki luvo sisteminin bakım eniyilemesi problemi ele alındığından literatürde eksik olan bu tarz vaka çalışması alanına katkıda bulunulmuştur.
- Çok-bileşenli sistemlerde ekonomik bağımlılık, bakım faaliyetlerinde gruplama mantığını getirip olası eylem sayısını düşürdüğü için, literatürde diğer bağımlılık çeşitlerine göre daha çok çalışılmıştır. Yapısal bağımlılıkla ilgili olabilecek sadece birkaç makale yayınlanmıştır. Rassal bağımlılık çalışan makaleler de genelde iki-bileşenli sistemleri ele almışlardır. Dolayısıyla aralarında rassal bağımlılık bulunan ikiden fazla bileşenli arıza etkileşimli sistemlerin bakım eniyilemesi, modellenmesi ve çözümünü literatürde açık alandır. Ayrıca birden çok bağımlılık çeşidini birarada ele alan çok az çalışma bulunmaktadır. Projede termik santrallerde bulunan luvo sisteminin bileşenleri arasındaki rassal ve yapısal bağımlılıklar DBN'ler ve faktörlü POMDP'ler kullanılarak ifade edilip modellenmiştir.
- Literatürde çok-bileşenli sistemlerin bakım eniyilemesi problemi ağırlıklı olarak sonsuz planlama ufku varsayımı altında modellenmişlerdir. Projede ele alınan luvo sisteminin bakım eniyilemesi problemi sonlu planlama ufkunda çalışıldığından literatüre bu konuda katkı sağlanmıştır.

- DBN'lerin bakım eniyilemesi alanında kullanımı çok ender olup genelde yakın konular olan hata tespiti, güvenilirlik, risk analizi ve öngörü alanlarında çalışılmıştır. Projede bileşenleri arasında rassal ve yapısal bağımlılıkları olan luvo sisteminin hem reaktif (sayı ve maliyet bazlı) hem de proaktif (maliyet bazlı) bakım eniyileme problemini çözmek için DBN tabanlı iki-seviyeli bir çerçeve sunulmuştur.
- Uygulanan bakım felsefeleri altında luvo sisteminin bileşenlerinin ve süreçlerinin durum olasılıkları DBN'ler kullanılarak çıkarımları (inference) yapılmış ve belirlenen bir bakım zamanında en uyum bakım eylemini seçmek için sekiz adet verimlilik kuralı geliştirilmiştir.
- Bakım eniyilemesi problemi hem toplam bakım sayısı hem de toplam maliyet açısından ele alınmıştır. Toplam bakım sayısını en azlamak için geliştirilen verimlilik kuralları sadece bileşenlerin olasılıklarını değerlendirirken toplam bakım sayısını en azlamak için bileşenlerin olasılıkları yanında maliyetlerini de dikkate alması gerektiğinden her iki faktörü de adil olarak değerlendirmesi açısından bakım eylemlerinin maliyetleri için bir normalizasyon yöntemi geliştirilmiştir.
- DBN'lerin kullanıldığı proaktif bakım stratejilerinde önleyici bakımların sıklığına bağlı olarak daha çok bakım yapıldığından aynı bileşeni arka arkaya seçme durumunun önüne geçebilmek için bir tabu yöntemi yaklaşımı sunulmuştur.
- POMDP'lerin çözüm performansını iyileştirmeye yönelik çalışmalar gerek gösterim gerekse çözüm algoritmaları olsun genelde robotik alanındaki ihtiyaçlar doğrultusunda geliştirilmiştir. Daha hızlı ve etkin çözüm bulmak için önerilen yöntemler ağırlıklı olarak bilgisayar bilimleri alanında geliştirilip uygulanmış olup diğer alanlarda uygulamalarına ender rastlanmaktadır. Bu projede faktörlü POMDP'lerin çok-bileşenli bir sistemin bakım eniyilemesi problemini modellemek ve çözmek için klasik POMDP'lere göre daha uygun olduğu deneysel çok bileşenli bir sistem üzerinden gösterilmiştir. Ayrıca POMDP'lere göre daha etkin senaryo analizine imkan verdiği ve elde edilen bakım politikalarının önceden belirlenmiş politikalara göre daha başarılı olduğu değişik senaryolar kurgulanarak gösterilmiştir.
- Luvo sistemini durum bazlı bakım problemi faktörlü bir POMDP çözücüsü ile modellenip değişik senaryolar altında yaklaşık bakım politikaları elde edilmiştir. Böylece, faktörlü POMDP'ler ilk defa çok-bileşenli bir gerçek hayat sisteminin bakım eniyilemesi problemini modellemek ve çözmek için kullanılmıştır.

3 GEREÇ VE YÖNTEM

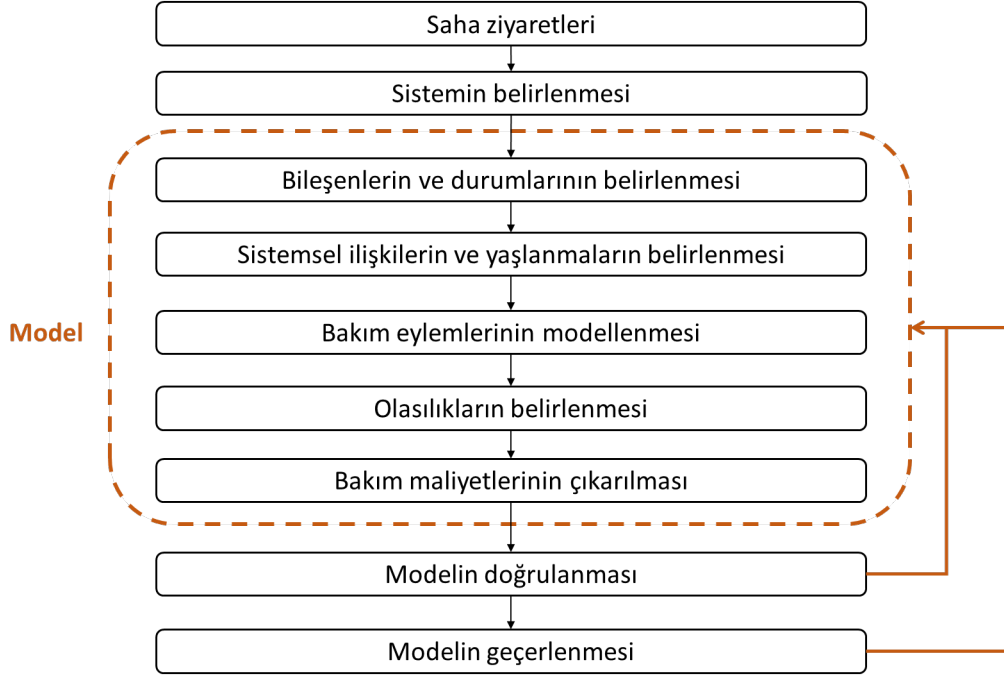
Bu bölümde olasılıklı grafiksel modellerden DBN ve POMDP'leri karmaşık sistemlerin bakım problemi üzerinde uygulamak üzere problem tanımı yapmak ve model geliştirmek için öncelikle ele alınan vaka çalışması hakkında bilgi verilmiştir. Bakım planlaması kritik olup da çok-bileşenli karmaşık sistemlerin bulunduğu bir termik santrale saha ziyaretleri gerçekleştirilmiştir. Santraldeki Hava-Gaz sisteminin önemli bir parçası olan dönerli hava ısıtıcısı olarak da adlandırılan Luvo sistemi proje kapsamında çalışılmak üzere seçilmiştir. Bu bölümün sonraki kısımlarında Luvo için geliştirilen DBN modelinin detayları, DBN'ler kullanılarak önerilen reaktif ve proaktif bakım stratejilerinin detayları, bakım zamanı belirlendiğinde bakım eylemini seçmek üzere önerilen bakım yöntemleri, DBN'ler kullanılarak önerilen alternatif proaktif bakım stratejileri açıklanmıştır. Bu bölümün son kısmında ise POMDP'ler kullanılarak gerçekleştirilecek durum bazlı bakım stratejileri için sırasıyla MDP, POMDP, faktörlü POMDP ile POMDP modellerini çözmek için geliştirilen kesin ve yaklaşık çözüm yöntemleri hakkında detaylı bilgi verilmiştir.

3.1 Saha Ziyaretleri

Proje kapsamında ele alınacak olan kısmi gözlemlerin olduğu çok-bileşenli karmaşık bir gerçek sistemin bakım problemine ait sistem ve bileşenlerin belirlenebilmesi için bir termik santrale saha ziyaretleri yapılmıştır. Termik santrale birinci rapor dönemi içerisinde üç adet saha ziyareti gerçekleştirilmiştir. İlk saha ziyaretinde amaç termik santral sisteminin tamamını inceleyerek nasıl çalıştığını anlamaktır. Bunun için, literatür araştırmalarının ışığında uzmanlara ve teknik ekibe sorulacak sorular hazırlanmıştır. İkinci ve üçüncü saha ziyaretleri, bakım eniyilemesi yapılacak olan sistemi santraldeki teknik ekiple beraber detaylı incelemek ve modellemede gereken bilgileri temin etmek için gerçekleştirilmiştir. Modelin kurulmasında izlenen adımlar Şekil 2'de verilmiştir.

3.2 Sistemin Belirlenmesi

Termik santraller çok çeşitli sistemlerden oluştuğu ve her bir sistem için farklı uygulamalar olduğundan, bütün termik santralin proje kapsamında ele alınması mümkün olmamıştır. Bu yüzden termik santralin içinden projenin amacına uygun, çok-bileşenli karmaşık bir yapıya sahip ve kendi içinde bütünlüğünü koruyabilen bir alt sistemin seçilmesi uygun görülmüştür. Bu bölümde



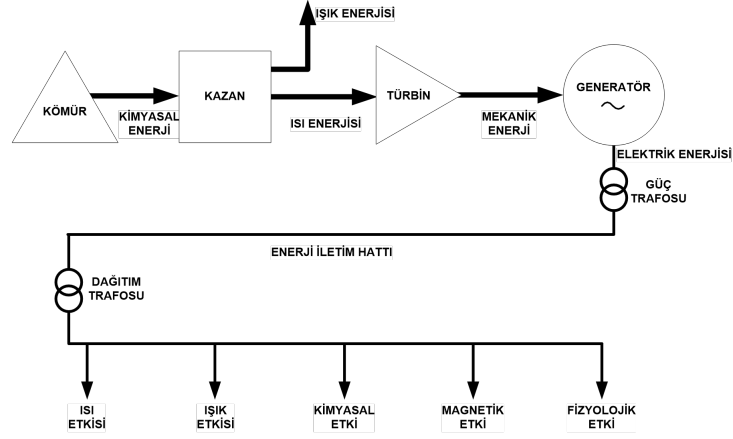
Şekil 2. Modelin kurulma aşamaları

santraldeki genel işleyişten başlayıp seçilen alt sisteme kadar örnek bir termik santrali ile ilgili bilgiler verilecektir.

3.2.1 Örnek Termik Santrali

Şekil 3'de örnek bir termik santralin işleyişi basit olarak gösterilmiştir. Termik santrallerde katı, sıvı ve gaz halindeki yakıtların içindeki kimyasal enerji kazan ve türbin aracılığıyla ısı enerjisine ve mekanik enerjiye, daha sonra jeneratör yardımıyla da elektrik enerjisine dönüştürülür.

Santral, 8 ana sistemden oluşmaktadır: Yakıt Besleme Sistemi, Hava-Gaz Sistemi, Kül ve Cüruf Sistemi, Su Arıtma Sistemi, Su Buhar Çevrimi Sistemi, Soğutma Suyu Sistemi, Hava Gazı Arıtma Sistemi ve Elektrik Sistemi. Bu sistemlerin genel özellikleri Şekil 4'te verilmiştir. Projede bu sistemlerin içinden hava-gaz sistemi seçilerek üzerinde çalışılmıştır. Bu seçim yapılırken termik santral çalışanları ile birlikte hareket edilmiş, hava-gaz sistemi içindeki alt sistemlerin bileşen sayıları, arıza sıklıkları, termik santral için kritiklikleri dikkate alınmıştır.



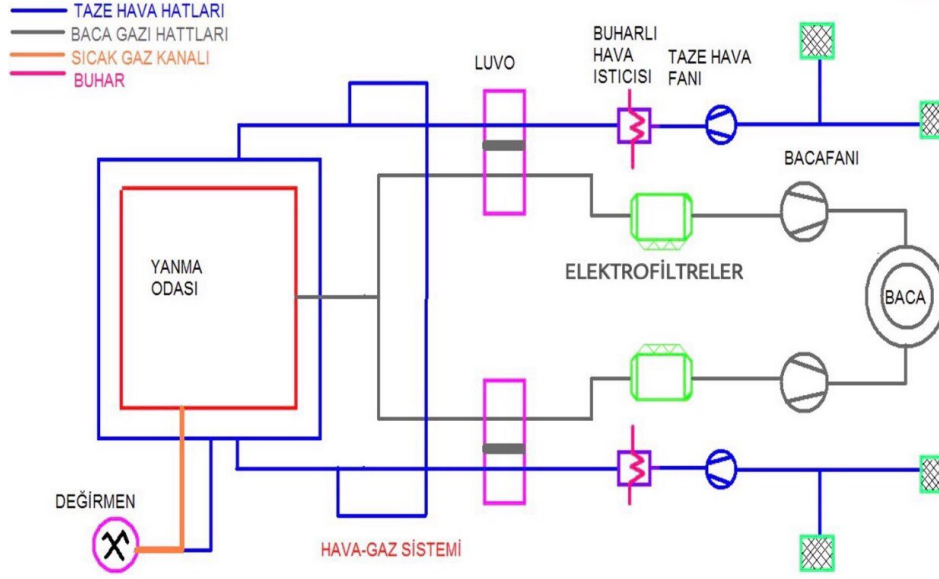
Şekil 3. Örnek bir termik santralin genel işleyişi



Şekil 4. Termik santral sistemleri

3.2.2 Hava-Gaz Sistemi

Hava-Gaz Sistemi, özetle yanma için gereken havayı temin edip, yanma sonucu ortaya çıkan gazı atmaya yarar. Bu sistem; taze hava fanı, buharlı ön ısıtıcı, Luvo, cebri çekme fanı ve baca alt sistemlerinden oluşur. İşleyiş şeması Şekil 5'te verilen Hava-Gaz Sisteminde sırasıyla aşağıdaki olaylar meydana gelir:



Şekil 5. Hava gaz sistemi

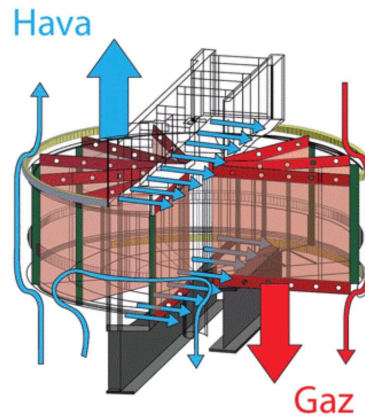
- Kömürü kurutmak ve yanmayı gerçekleştirmek için gerekli olan hava, taze hava fanlarıyla dışarıdan alınır.
- Taze hava fanıyla alınan hava, buharlı hava ısıtıcılarından geçer ve Luvolarda sıcaklıkları yükseltilir.
- Luvolara 30-40 °C' yle gelen hava, Luvodan 400 °C ve 200 °C olarak iki farklı ısıda çıkar. 400 °C olan hava kömürü kurutmak üzere değirmene gönderilir, 200 °C olan hava ise yanma odasına yanma havası olarak gönderilir.
- Kazanda yanma sonucu ortaya çıkan gaz, kazanın içerisinden cebri çekme fanlarıyla çekilerek, Luvo giriş havasını ısıtmak üzere Luvoya gönderilir.
- Luvoda ısısını kaybeden gaz, külünün temizlenmesi için elektrofiltrelere gönderilir.

- Temizlenen gaz cebri çekme fanları üzerinden baca gazı arıtma sistemine gönderilerek atmosfere salınır.

Hava-Gaz Sistemi paralel iki hattan oluşur. Bu hatların içindeki herhangi bir alt sistem bozulduğunda, sistem tek hat çalışmaya devam edebilir, ancak kapasite yaklaşık yüzde 50'ye düşer. Hava-Gaz Sisteminin alt sistemleri santral çalışanlarıyla görüşülerek tek tek çıkarılmış, alt sistemlerin görevleri ve kendi içsel bütünsellikleri dikkate alınmıştır. Bunlar içinde buharlı ön ısıtıcı, sadece havanın soğuk olduğu durumlarda, gerektiğinde kullanılmaktadır. Diğer kalanlar içinde görev itibarıyla termik santralin çalışması açısından kritikliği (kazana ve değirmenlere farklı iki seviye sıcaklıkta hava sağladığı için), kapsadığı bileşen sayısı, bileşenler arasındaki ilişkilerin karmaşıklığı (rassal ve yapısal bağımlılıklar) bakımından Luvo (Regenerative Air Heater-RAH) alt sistemi projede çalışılmak üzere belirlenmiştir.

3.2.3 Luvo Sistemi

Dönerli hava ısıtıcı olarak da adlandırılan Luvo, havayı ısıtmak için kullanılır. Luvo sistemi, paralel iki motor grubu (rulman, sargı, izolasyon malzemesi, mil-rotor), iki redüktör, petekler ve Luvo izolasyonundan oluşur. Şekil 6'da Luvo sistemi şematik olarak gösterilmiştir. Burada mavi ok temiz havayı, kırmızı ok ise kazandan çıkan çürük buharı göstermektedir. Döner bir aksam üzerinde hareket eden Luvo sisteminde saç plakalardan oluşan peteklerden geçen hava ve gaz ısı alışverişi yapar. Isısını kaybeden gaz elektrofiltreye giderken, ısınmış hava ise kömürün nemini almak üzere değirmene ve kazanın yanma odasına gönderilir.



Şekil 6. Luvonun 3-boyutlu görünümü (POWER Magazine, 2020)

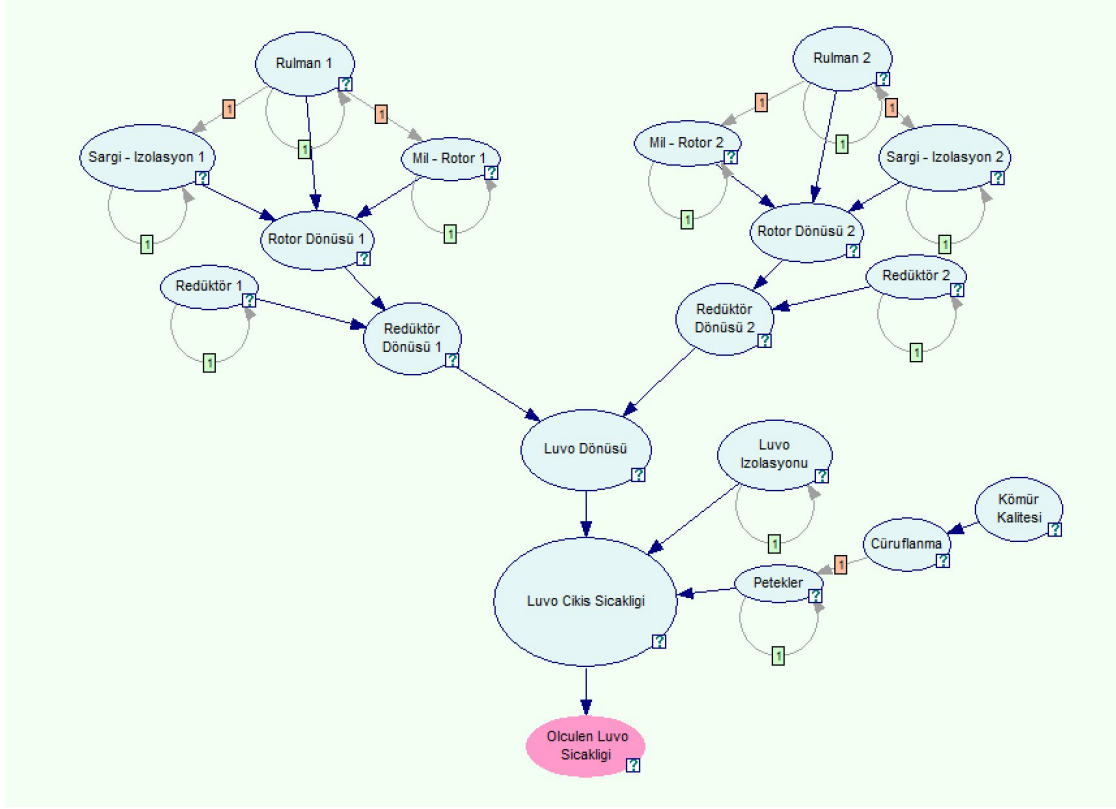
3.3 Luvo DBN Modelinin Kurulması

Luvo sisteminin modellenmesi yapılırken saha ziyaretleri sırasında elde edilen verilerden yararlanılmış, ayrıca telefon ve e-postalar ile termik santral çalışanlarından her bileşen hakkında gerektiğinde daha detaylı bilgiler alınmıştır. Oluşturulacak DBN modelinin nitel ve nicel kısımları için Luvo bileşenleri, süreçleri ve ölçümleri, bileşenler arasındaki bağımlılıkların detayı, bileşenlerle Luvo süreçlerinin etkileşimi, bir bileşenin bozulmasının ona bağlı olan diğer bileşenleri nasıl etkilediği, bileşenlerin durumları arasında ortalama geçiş hızları (transition rate) ve bileşenlere yapılan bakım eylemleri ile bunların bileşenlere etkileri konularında santraldeki teknik ekip ile mutabık kalınmıştır. Bunlara göre model, Matlab – BNT araç kutusu (Murphy, 2001) kullanılarak kodlanmıştır, ayrıca Genie Modeler (BayesFusion, 2020) programı ile de görselleştirilmiş ve kodlamanın doğruluğu kontrol edilmiştir. DBN modline ilaveten, reaktif ve proaktif bakım eniyilemesinde gerekli olan maliyet ile ilgili bilgiler de – her bileşenin onarım ve değişim maliyetleri, ne kadar sürede tamir edildiği, bu onarım sırasında termik santralin duruş maliyeti – santral ziyaretleri ve sonraki görüşmelerle elde edilmiştir.

3.3.1 Bileşenlerin ve Durumlarının Belirlenmesi

DBN modelindeki bileşenler belirlenirken, sistemi oluşturan temel ekipmanlar ve bunların yaptıkları işlemler baz alınmıştır. Luvoda iki adet paralel motor grubu bulunmaktadır ve her bir motor grubunun dört adet bileşeni vardır. Bu iki motor grubu normal şartlarda aynı anda çalışmakta olduğundan ve bir grup bozulduğunda diğer grupla da çalışmaya devam edilebildiğinden toplamda motor gruplarına ait on adet bileşen, ilk aşamada, modele dahil edilmiştir. Motor grupları hariç iki adet bileşenle beraber Luvoda toplam on iki bileşen modellenmiştir. Oluşturulan ilk modelde motorda bulunan sargı ve izolasyon ayrı bileşenler olarak incelenmiştir (Özgür-Ünlüakın vd., 2018). Bu çalışmalar sırasında sargı ve izolasyonun birbirlerini karşılıklı olarak doğrudan etkiledikleri için güvenilirliklerinin birlikte hareket ettikleri gözlemlenmiştir. Buradan yola çıkılarak, sonraki çalışmalar için bu iki bileşenin tek bileşen grubu olarak ele alınmasına karar verilmiş ve bunun sonucunda motor gruplarında toplam sekiz bileşen, Luvo modelinde de toplam on bileşenle yeni bir model oluşturulmuştur (Özgür-Ünlüakın vd., 2019). Oluşturulan güncel model Şekil 7’de gösterilmektedir.

Modelde de gösterildiği gibi Luvo, paralel iki motor grubundan (rulman, mil-rotor, sargı-izolasyon ve redüktör), Luvo izolasyonu ve peteklerden oluşmaktadır. Burada dört düğüm tipi



Şekil 7. Luvo sistemi DBN modeli

vardır: dinamik düğümler, süreç düğümleri, harici (exogeneous) düğümler ve gözlem düğümü. Şekil 7’de, dinamik düğümler, süreç düğümleri ve harici düğümler açık mavimsiyle, gözlem düğümü ise pembe ile gösterilmiştir. Dinamik düğümler, bileşenlerin yaşlanmaya bağlı olarak dinamik olarak değişimlerini temsil eder. Süreç düğümleri, bileşenler ile ebeveynleri arasındaki herhangi bir zaman diliminde meydana gelen etkileşimi göstermek için kullanılır. Harici düğümler, santral çalışanları tarafından kontrol edilemeyen dış etkenleri temsil etmektedir. Son olarak, gözlem düğümü ise sistemin durumunun ölçümünü gösteren düğümdür. Dinamik düğümler üzerinde “1” ile gösterilen oklar, dinamik düğümlerle modellenen Luvo bileşenlerinin zaman içinde yıpranma ve yaşlanmaları ile bileşenler arasındaki zamansal (temporal) ilişkileri ifade etmektedir. Diğer oklar ise düğümler arasındaki nedensel ilişkileri temsil etmektedirler.

Ele alınan termik santralde düzenli olarak denetleme yapılmamaktadır. Santral çalışanları saha ziyaretleri sırasında bazı bileşenleri elle veya dinleyerek kontrol edebilseler de, bunlar sistematik olmayan ve güvenilirliği, kontrol eden çalışanın deneyimine bağlı olan denetlemelerdir. Sadece

Luvo'nun çıkış sıcaklığı sensörler ile ölçülüp kısmi olarak gözlemlenebilmektedir. Bu yüzden sadece "ölçülen Luvo sıcaklığı" gözlem düğümü olarak modelde ele alınmıştır. Bütün sensörlerde olduğu gibi bu sensörde de yanılma payı olduğu göz ardı edilmemelidir. Bu nedenle Luvo çıkış sıcaklığı ile ölçülen Luvo sıcaklığı farklı düğümler ile ele alınmıştır. Bileşenlerin ve modeldeki bütün düğümlerin alabileceği durumlar termik santral çalışanlarıyla birlikte belirlenmiştir. Bu durumlar Tablo 4'te verilmiştir. Gözlem düğümü olan ölçülen Luvo sıcaklığı için örnek vermek gerekirse, eğer Luvo çıkış sıcaklığı 200°C'den düşükse, "Çok düşük", 200°C ile 400°C arasındaysa, "Düşük", 400°C'den yüksekse "Normal" durumunda kabul edilir.

Tablo 4. Luvo modeli düğümler ve durum uzayları

Düğüm	Tipi	Adet	Durum Uzayı
Rulman (Rm)	Dinamik	2	Normal, İyi Yataklama Yapmıyor, Kilitlenmiş
Mil-Rotor (MR)	Dinamik	2	Normal, Ekseni Kayık
Sargı-İzolasyon (Sİ)	Dinamik	2	Orijinal, Yanmış
Redüktör (Rd)	Dinamik	2	Normal, Arızalı
Luvo İzolasyonu (Lİ)	Dinamik	1	Kaçak Yok, Orta Seviye Kaçak, Yüksek Seviye Kaçak
Petekler (Pt)	Dinamik	1	Yeni, Temizlenmiş, Kirli
Rotor Dönüşü	Süreç	2	Dönüyor, Dönmüyor
Redüktör Dönüşü	Süreç	2	Dönüyor, Dönmüyor
Luvo Dönüşü	Süreç	1	Dönüyor, Dönmüyor
Luvo Çıkış Sıcaklığı	Süreç	1	Normal, Düşük, Çok Düşük
Kömür Kalitesi	Harici	1	Uygun, Uygun Değil
Cüruflanma	Harici	1	Var, Yok
Ölçülen Luvo Sıcaklığı (O)	Gözlem	1	Normal, Düşük, Çok Düşük

3.3.2 Sistemsel İlişkilerin Belirlenmesi

Luvo sisteminin bileşenleri arasındaki ilişkiler ve bağımlılık yapılarının ortaya çıkarılmasında termik santral çalışanlarıyla görüşmeler yapılmıştır. Ekipmanlar yerinde incelenmiş, daha sonra termik santral çalışanlarından bileşenlerin nasıl çalıştığıyla ilgili bilgiler alınmış, onlara yönlendirici sorular yöneltilerek sistemin çalışması ayrıntılı şekilde öğrenilmiştir. Bileşenler arasındaki ilişkiler ve rassal bağımlılıklar belirlenirken bazı anahtar kelimeler kullanılmıştır. Örneğin termik santral çalışanlarına "Rulmanın iyi yataklama yapmaması mil ve rotorun çalışmasını nasıl etkiler, bu etki ne kadar sürede hissedilir?" gibi sorular yöneltilmiş ve alınan cevaplara göre geçiş süreleri, bunlara göre de geçiş olasılıkları hesaplanmıştır. Luvo sisteminin bileşenleri arasındaki ilişkiler aşağıda verilmiştir:

- Luvo, paralel iki motor grubundan oluşur. Bu iki motor grubundan birisi bozulduğunda, Luvo bir motor grubu ile çalışmaya devam eder. Sadece, kazan ilk devreye alınırken iki motor

grubunun da çalışması gereklidir. Bu çalışmada böyle bir durumun meydana gelmediği varsayılmıştır. Eğer iki motor grubu da bozulursa, Luvo kullanılamaz.

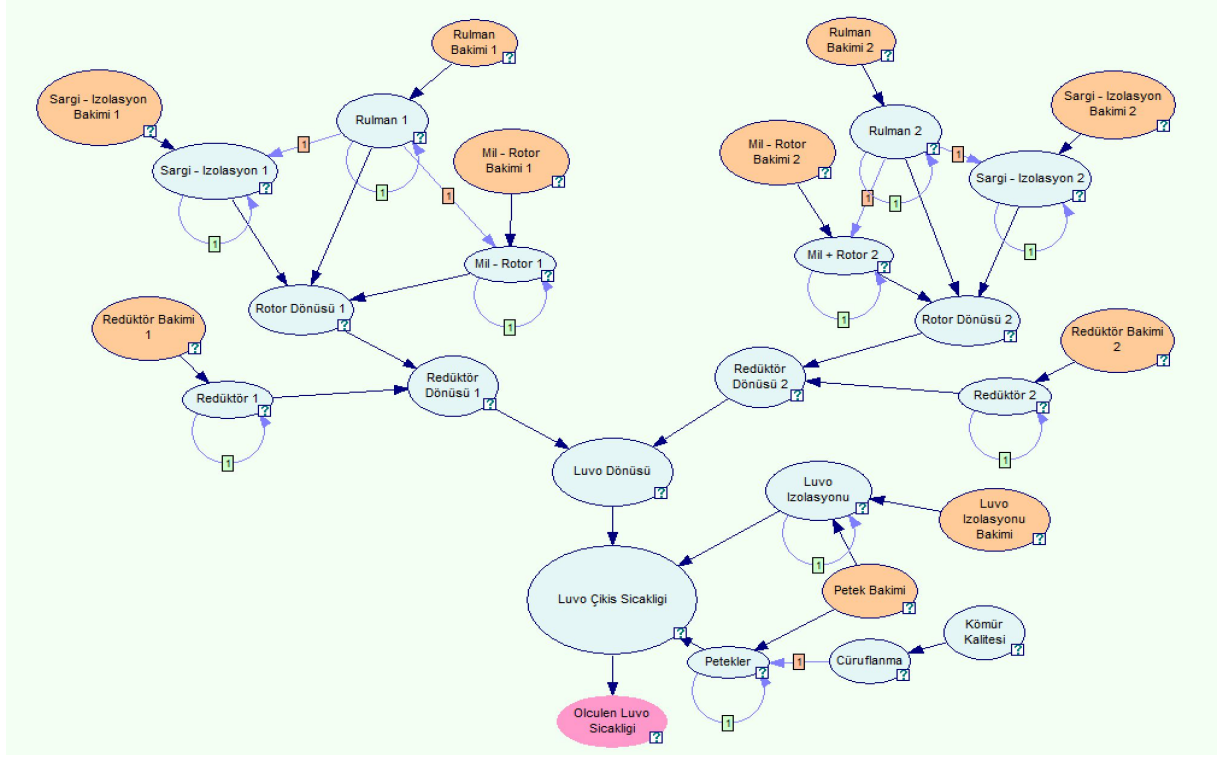
- Rulman, sargıları ve mil-rotor hizalamasını etkiler. Rulman kilitlemeleri, aşırı akıma ve bunun sonucunda motor sargılarında ısınmaya ve kısa devreye sebep olabilir.
- Motor sargıları, rulman kilitlemeleri ve izolasyon kaybı durumunda nominal koşullardan daha fazla ısınarak yanabilir.
- Entegre edilmiş mil ve rotor rotasyonu sağlayan bileşenlerdir. Rulman kilitlendiğinde veya yanlış hizalandığında, mil ve rotor dönme kabiliyetini kaybedebilir veya eksenel olarak yanlış hizalanabilir.
- Redüktör, farklı devirlerde dönme hareketi elde edebilmek için kullanılan aktarma organıdır. Bu nedenle redüktörün dönüşü, rotorun dönüşü ve redüktörün kendi mekanik yapısının durumuna doğrudan bağlıdır. Luvo dönüşü için iki redüktörden en az biri dönmelidir.
- Luvo petekleri dönerek havanın ısıtılmasını sağlar. Luvo petekleri, kömürün kalitesinin düşük olması durumunda oluşan cüruftan etkilenerek aşınabilir. Bu da Luvo çıkış sıcaklığının düşmesine, yani performans kaybına neden olur.
- Luvo izolasyonu, Luvo peteklerinin üzerindedir. Luvo izolasyonunda sızıntı olması durumunda, Luvo sıcaklığı yeterli seviyeye ulaşamaz ve performans düşer. Kaçak miktarı ciddi boyutlarda ise bu performans bakımından ciddi sorunlara neden olabilir.

Luvo sisteminde bileşenler arasında rassal ve yapısal bağımlılıklar görülmektedir. Rulmanın kilitlemesi, motor sargılarının yanmasına neden olduğundan dolayı, rulman ile sargı-izolasyon arasında rassal bağımlılık vardır. Ayrıca rulmanın iyi yataklama yapmaması, mil-rotorun ekseninin kaymasına ve dönme işlevini tam olarak yerine getirememesine sebep olduğundan, rulman ile mil-rotor da birbirine rassal olarak bağlıdır. Luvo izolasyonu ile petekler arasında ise yapısal bağımlılık vardır. Bunun nedeni peteklerin temizlenmesi gerektiğinde Luvo izolasyonunun da değiştirilmesinin gerekmesidir. Bu bağımlılıklar ve toplam bileşen sayısı dikkate alındığında, Luvonun çok bileşenli karmaşık bir yapıya sahip olduğu söylenebilir.

3.3.3 Bakım Eylemlerinin Modellenmesi

Bir DBN modelinde, etki diyagramındaki (influence diagram) gibi eylemler açıkça modele dahil edilmez. Bu yüzden, bu çalışmada her bir bileşenin değişimi ve onarımı için olasılıksal eylem

düğümüleri oluşturulmuştur. Eylem düğümlerinin amacı, bileşenlerin onarımının ve değişiminin diğer bileşenlerin geçmişteki ve dolayısıyla o andaki durumlarını ve bozulma olasılıklarını etkilemesini önlemektir. Şekil 8, Luvo sisteminin eylem düğümleri eklendikten sonraki DBN modelini göstermektedir. Şekilde, turuncu ile gösterilen düğümler, eylem düğümleridir.



Şekil 8. Eylem düğümleri eklendikten sonra oluşan Luvo sistemi DBN Modeli

Tablo 5, eylem düğümleri ile bunların adetlerini ve durum uzaylarını göstermektedir. İlk dört eylem düğümü paralel motor grubuna ait olduğundan her biri modelde ikişer kere tanımlanmıştır. Dolayısıyla modelde toplam 10 adet eylem düğümü bulunmaktadır. Mil-rotorun ve peteklerin değişimlerinin, gerekiyorsa, yılda bir kez gerçekleşen revizyonlarda yapıldığı varsayıldığından eylem düğümlerinin durum uzayı içerisinde tanımlanmamıştır. Eylem düğümlerinin durum uzaylarında tanımlanan durumları açıklamaları şöyledir:

- “Bir Şey Yapma” eylemi o bileşenin kendi halinde, hiçbir değişiklik yapılmadan bırakılmasını,
- “Değiştir” eylemi bileşenin yenisiyle değiştirilmesini,
- Mil-Rotor bakımındaki “Tıraşla” eylemi rotorun eksen kayması durumunda tıraşlanmasını,

Tablo 5. Luvo modeli eylem düğümleri

Eylem Düğümleri	Adet	Durum Uzayı
Rulman Bakımı	2	Değiştir, Bir Şey Yapma
Sargı-İzolasyon Bakımı	2	Değiştir, Bir Şey Yapma
Mil-Rotor Bakımı	2	Tıraşla, Bir Şey Yapma
Redüktör Bakımı	2	Değiştir, Bir Şey Yapma
Luvo İzolasyonu Bakımı	1	Değiştir, Bir Şey Yapma
Petekler Bakımı	1	Temizle, Bir Şey Yapma

- Petek bakımındaki “Temizle” eylemi peteklerin kimyasallar kullanılarak özel bir şekilde temizlenmesini temsil etmektedir.

3.3.4 Olasılık Yapısı

DBN modelindeki bileşenlerin yaşlanmalarına ve birbirleriyle olan ilişkilerine bağlı olan nedensel ve geçişken olasılıklar belirlenirken geçmiş veri analizlerinden (bozulma verileri, revizyon raporları ve bakım emirleri) ve termik santral çalışanlarının bigilerinden yararlanılmıştır. Bileşenlerin en iyi durumda kalma olasılıkları, en iyi durumdan herhangi başka bir duruma geçinceye kadar geçen ortalama süreye göre hesaplanmış ve Tablo 6’da verilmiştir. Üç durumlu bileşenlerde kalan olasılık, en iyi durumdan diğer iki duruma toplam geçiş olasılığı, uzmanlarla mutabık kalınan en iyi durumdan diğer iki durumun her birine geçiş hızı tahminleri oranında diğer durumlara paylaştırılmıştır. Termik santral, her yıl sonunda 2 ay süren büyük bir bakıma girmekte ve bu bakım sırasında bütün bileşenler yenilenmekte veya en iyi durumlarına döndürülecek şekilde tamir edilmektedir. Büyük bakımlar arası böylesine 300 günlük kısa bir süre olduğu göz önüne alındığında, olasılık hesaplamalarında sabit geçiş hızlarının kullanılması mantıklıdır.

Tablo 6. Luvo modeli bileşenlerinin en iyi durumda kalma olasılıkları

Bileşen	En iyi durumda kalma süresi (gün)	En iyi durumda kalma süresi (yıl)	En iyi durumda kalma olasılığı
Rulman	1200	4	0,99916
Motor	1500	5	0,99933
Mil+Rotor	4500	15	0,99978
Redüktör	900	3	0,99889
Petek Temizleme+İzolasyon	3000	10	0,99967
Luvo İzolasyonu	900	3	0,99889

Ortalama geçiş hızları ve uzman görüşlerine dayanılarak bütün bileşenlerin zamana bağlı geçiş olasılıkları belirlenmiştir. Başlangıç olasılıkları olarak, yıllık yapılan revizyonlardan sonraki dönem baz alındığı için, tüm bileşenlerin en iyi durumda oldukları varsayılmıştır. Daha sonraki zamanlarda eğer bakım eylemi yapıldısa ilgili bileşen yine en iyi durumuna getirilmiştir. Luvo DBN modelinin tüm başlangıç, geçiş ve koşullu olasılıkları Ek B’de sunulan tablolarda verilmiştir. Tablo 7’de, dinamik bir düğüm olan Luvo izolasyonunun geçiş olasılıkları örnek olarak verilmiştir. Luvo izolasyonu veya petekere bir bakım yapılmazken “Kaçak yok” durumundan “Kaçak yok” durumuna geçiş olasılığı, Luvo izolasyonunun “Kaçak yok” durumundan çıkana kadar geçen ortalama gün sayısına göre hesaplanmıştır. Bu süre, santraldeki uzmanlar tarafından yaklaşık 900 gün olarak verildiğinde ilgili olasılık 0,99889 olarak bulunmuştur. “Kaçak yok” durumundan “orta seviye kaçak” ve “Kaçak yok” durumundan “yüksek seviye kaçak” durumuna geçiş olasılıkları geriye kalan olasılığın uzman görüşlerine dayandırılmış ilgili ortalama geçiş hızları oranında paylaştırılarak sırasıyla 0,00078 ve 0,00033 olarak hesaplanmıştır. Aynı şekilde “orta seviye kaçak”tan “yüksek seviye kaçak” durumuna geçme olasılığı da luvo izolasyonu orta seviye kaçak durumundan başlatıldığında yüksek seviye durumuna geçene kadar geçen süreye göre (yaklaşık 500 gün) hesaplanmış ve 0,002 olarak bulunmuştur.

3.3.5 Maliyet Yapısı

Her bileşenin değişim ve onarım maliyeti, onarım süresi, bu onarım sırasında geçen süreye bağlı olarak oluşan kayıp satış maliyeti öğrenilmiş, buna göre bir bileşenin onarımı sebebiyle gerçekleşen toplam maliyet, reaktif ve proaktif bakım için ayrı ayrı Denklem (1) kullanılarak hesaplanmıştır. Her bir bileşen için yapılan hesaplamaların detayları Tablo 8’de verilmiştir. Eylem maliyeti (EM_i) o bileşenin reaktif veya proaktif olarak değiştirilmesi veya onarılması sırasında bileşenin bakımı için harcanan maliyeti, duruş süresi (DS_i) reaktif bakımda bileşenin bozulmasından proaktif bakımda ise bakım eyleminin başlamasından bakımın bitişine kadar geçen süreyi göstermektedir. Reaktif bakım sırasında termik santralde elektrik üretilmediğinden dolayı, bakımlar tabloda “ DM_i ” olarak gösterilen saatlik duruş maliyetine neden olmaktadır. Luvo sistemi iki paralel motor grubundan oluştuğundan, motor grubundaki bileşenlerin proaktif bakımı sırasında sistemin tamamen durdurulması gerekmez. Bu yüzden bu bileşenlerin proaktif duruş maliyetleri sıfır olarak alınmıştır. Reaktif bakıma gereksinim duyulması için sistemin tamamen bozulmuş olması gerektiğinden, bu paralelliğin avantajı ortadan kalkmaktadır.

$$Maliyet_i = EM_i + DS_i * DM_i \quad (1)$$

Tablo 7. Luvo izolasyonunun koşullu olasılıkları

Luvo izolasyon bakımı	Değiştir		
Petekler bakımı	Temizle		
Kendi (t-1)	Kaçak yok	Orta seviye kaçak	Yüksek seviye kaçak
Kaçak yok	1	1	1
Orta seviye kaçak	0	0	0
Yüksek seviye kaçak	0	0	0

Luvo izolasyon bakımı	Değiştir		
Petek bakımı	Bir şey yapma		
Kendi (t-1)	Kaçak yok	Orta seviye kaçak	Yüksek seviye kaçak
Kaçak yok	1	1	1
Orta seviye kaçak	0	0	0
Yüksek seviye kaçak	0	0	0

Luvo izolasyon bakımı	Bir şey yapma		
Petek bakımı	Temizle		
Kendi (t-1)	Kaçak yok	Orta seviye kaçak	Yüksek seviye kaçak
Kaçak yok	1	1	1
Orta seviye kaçak	0	0	0
Yüksek seviye kaçak	0	0	0

Luvo izolasyon bakımı	Bir şey yapma		
Petekler bakımı	Bir şey yapma		
Kendi (t-1)	Kaçak yok	Orta seviye kaçak	Yüksek seviye kaçak
Kaçak yok	0,99889	0	0
Orta seviye kaçak	0,00078	0,998	0
Yüksek seviye kaçak	0,00033	0,002	1

Termik santralde her saat 181 kw elektrik üretilmektedir. Bu üretimin %35'i elektrik taleplerinin ve fiyatlarının günlük olarak belirlendiği iç piyasaya; %65'i ise önceden belirlenen fiyatlarla ikili anlaşma yapılan firmalara tedarik edilir. Proaktif bakımdaki duruş maliyeti hesaplanırken santralin genel giderleri ile iç piyasa ve ikili anlaşmalar gereği belirlenen elektrik fiyatı üzerinden gerçekleştirilemeyen kar zararı göz önünde bulundurulmuştur.

Reaktif bir bakım gerektiğinde, santral beklenmedik bir şekilde durur, iç piyasa ve firmalara taahhüt edilen elektrik sağlanamaz. Bu nedenle firmalara mevcut elektrik fiyatına bağlı olarak bir ceza ödemesi yapılır. Bu nedenle, oluşan ceza maliyeti de duruş süresi maliyetine eklenmelidir. Günlük elektrik fiyatları 0,40 TL/kw ve anlaşma yapılan firmalarla önceden mutabık kalınan fiyat 0,30 TL/kw olarak alındığında proaktif ve reaktif bakım için duruş maliyetleri sırasıyla yaklaşık olarak 40.000 TL/saat ve 50.000 TL/saat olarak bulunmuştur. Şunu belirtmek gerekir ki bu

maliyetler Luvo sisteminde bir arıza meydana geldiğinde, bakım nedeniyle hava-gaz sistemi çalıştırılmaz ve dolayısıyla elektrik üretilmez. Bununla birlikte, termik santral iki paralel hava-gaz sistemine sahiptir ve bir hatta arıza meydana geldiğinde termik santral %50 kapasiteyle çalışmaya devam eder. Bu nedenle birim duruş maliyetleri 20.000 TL/saat ve 25.000 TL/saat olarak alınmıştır.

Öte yandan, proaktif eylem maliyeti ve eylem süresi, reaktif bakımdakilerin yarısı olarak alınır. Bunun nedeni, reaktif bakıma ihtiyaç duyulduğunda yeterli çalışan bulunamaması nedeniyle bakımın daha uzun sürmesidir. Buna ek olarak, sistem arıza nedeniyle durduğunda ihtiyaç duyulabilecek yedek parçalar da, acil alınması gerektiğinden, yüksek fiyatla alınabilmektedir. Tüm bileşenlerin reaktif ve proaktif bakım maliyetlerinin detayı Tablo 8’de verilmiştir.

Tablo 8. Luvo modeli bakım maliyetleri ve süreleri

Bileşen	Reaktif bakım			Proaktif bakım		
	$EM_i(TL)$	$DS_i(saatt)$	$DM_i(TL/saatt)$	$EM_i(TL)$	$DS_i(saatt)$	$DM_i(TL/saatt)$
Rm_{1,2}	2.000	1	25.000	1.000	0,5	0
Si_{1,2}	15.000	4	25.000	7.500	2	0
MR_{1,2}	1.500	4	25.000	750	2	0
Rd_{1,2}	2.000	2	25.000	1.000	1	0
Pt	1.600	6	25.000	800	3	20.000
Li	100	2	25.000	50	1	20.000

3.4 DBN ile Reaktif Bakım Modellemesi

Reaktif bakım, sistemde bir arıza meydana geldikten sonra arızayı giderip sistemi gereken fonksiyonlarını yapabilir hale getirmek için yapılan aktivitedir. Proje kapsamında ele alınan Luvo sisteminde, nihai gözlem düğümü olan ölçülen Luvo sıcaklığının “Çok düşük” durumunda olması sistemde bir arızaya işaret eder ve bunu gidermek için reaktif bakım başlatılır. Özgür-Ünlüakin ve Bilgiç (2014)’den esinlenerek, sistem bozulduğunda en uygun bakım eylemini belirlemek için uygulanabilecek sekiz adet sezgisel reaktif bakım yöntemi önerilmiştir (FEM_{fp} , FEM_{wp} , FEL_{fp} , FEL_{wp} , REM_{fp} , REM_{wp} , REL_{fp} , REL_{wp}). Bu yöntemlerin detayları sonraki bölümlerde ayrıntılı olarak verilecektir. Ayrıca, Bölüm 3.4 ve Bölüm 3.5’te kullanılan notasyonlar ve açıklamaları Tablo 9’da sunulmuştur.

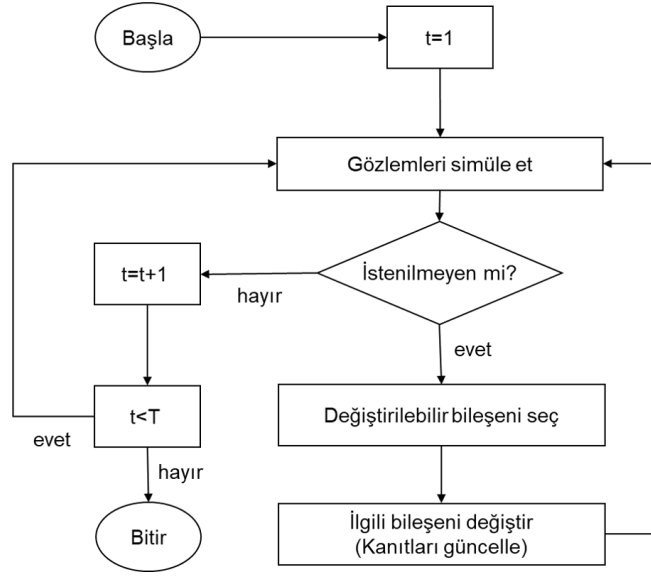
Tablo 9. Notasyonlar

I	Bileşenler kümesi	S_t	Luvo çıkış sıcaklığının t 'deki durumu
I'	Bakım yapılabilir bileşenler kümesi	ε	Bakım geçmişindeki birikmiş kanıtlar
T	Zaman aralıkları kümesi	$CIPM$	Sabit Aralıklı Proaktif Bakım
i	Bileşen indeksi	$DIPM$	Dinamik Aralıklı Proaktif Bakım
i^*	Bakım için seçilen bileşen	$ThPM$	Eşiğe Dayalı Proaktif Bakım
t	Zaman aralıkları indeksi	pci	CIPM için proaktif sabit aralık
$TMaliyet$	Kümülatif toplam bakım maliyeti	$CIMT$	Sabit aralıklı bakım periyotları dizisi
ψ_i	Düğüm i için toplam bakım maliyeti	pdi	DIPM için proaktif dinamik aralık
EM_i	Düğüm i için bakım eylemi maliyeti	pmt	DIPM için sonraki proaktif bakım süresi
DS_i	Düğüm i 'nin bakımı için duruş süresi	thr	ThPM eşik seviyesi
DM_i	Düğüm i 'nin bakımı için duruş maliyeti	$TabuSure$	Tabu süresi
W	En iyi durum	$TabuSureListe$	Her bileşenin tabu süresini tutan dizi
F	Bileşenlerin en kötü durumu	$TabuListe$	Tabu bileşenlerini tutan dizi
$\ÇD$	Gözlem düğümünün en kötü durumu	RB	Reaktif bakım
ef_{it}	i bileşenin t 'deki verimlilik ölçütü	PB	Proaktif bakım
C_{it}	i bileşenin t 'deki durumu, $i \in I$	Ss	Standart sapma
O_t	Gözlem düğümünün t 'deki durumu	GH	Games Howell test sonuçları
A_{it}	i bileşenin eyleminin t 'deki durumu	Tk	Tukey test sonuçları

3.4.1 Genel Akış ve Algoritma

Reaktif bakım politikasına ait genel akış şeması Şekil 9'da verilmiştir. Her t anında o ana kadar toplanan kanıtlar (evidence) altında gözlem düğümünün olasılıkları hesaplanarak gözlem düğümünün durum uzayından örneklem seçilir. Eğer bu düğüm sistemin arızalı olduğunu gösteriyorsa, sonraki bölümde detayları açıklanan yöntemlerden (FEM_{fp} , FEM_{wp} , FEL_{fp} , FEL_{wp} , REM_{fp} , REM_{wp} , REL_{fp} , REL_{wp} , RND) biri kullanılarak reaktif bakım yapılır. Bu yöntemler ile hangi bileşene bakım yapılması gerektiğine karar verilir. İlgili bileşenin bakımından sonra, gözlem düğümü tekrar kontrol edilir ve gerekirse aynı yöntemle göre kalan bileşenlerin içinden başka bir bileşen bakım yapılmak üzere seçilir. Bileşenlere bakım yapıldıkça tutulan kanıt listesi güncellenir. Bu işlem planlama ufkunun sonuna kadar sürdürülür.

Reaktif bakım politikasına ait genel akış algoritması Algoritma 1'de verilmiştir. Algoritmalarda ve formüllerde belirtilen gözlem düğümü (observation node) "Ölçülen Luvo Sıcaklığı"dır. Yöntemlerin formüllerinde verilen "ÇD" Luvo performansının en kötü durumunu (Çok Düşük), "Normal" ise en iyi durumunu göstermektedir. "1", eylem düğümlerinin ilk durumunu, yani "Değiştir"i temsil etmektedir. Ayrıca "W" bileşenlerin en iyi durumunu (best working state) gösterirken, "F" en kötü durumunu (failure) göstermektedir. C_{it} , A_{it} ve O_t sırasıyla t anındaki i bileşenin durumunu, i bileşenine ait eylem düğümünün durumunu ve gözlem düğümünün



Şekil 9. Reaktif bakım stratejisinin karar verme akışı

durumunu ifade etmektedir. Ψ_i , i bileşeninin toplam bakım maliyeti, ε ise o ana kadar toplanan kanıtlar listesidir. Reaktif bakım ve proaktif bakım ile önerilen bakım yöntemlerinin sözde kodlarına ait tüm parametreler Tablo 9'da tanımlanmıştır.

Algoritma 1 Reaktif bakım sözde kodu

- 1: Ayarla $t=1$, $TMaliyet = 0$
 - 2: **while** $t \leq T$ **do**
 - 3: Ayarla $I' = I$
 - 4: Gözlem düğümü O_t 'den örneklem al
 - 5: **while** $O_t = \text{"ÇD"}$ ise ve I' boş değilse **do**
 - 6: Hesapla e_{fit}, \forall_{it} (Denklemler (2)–(9)'a göre)
 - 7: Bakım yapılacak i^* bileşenini seç (Tablo 10'da verilen operatöre göre)
 - 8: Hesapla $\psi_{i^*} = EM_{i^*} + DS_{i^*} \times DM_{i^*}$
 - 9: Hesapla $TMaliyet = TMaliyet + \psi_{i^*}$
 - 10: Güncelle $\varepsilon \leftarrow \varepsilon \cup \{A_{i^*t} = 1\}$
 - 11: Gözlem düğümü O_t örneklem al
 - 12: Bakım yapılabilir bileşen listesini güncelle $I' \leftarrow I' \setminus \{i^*\}$
 - 13: $t \leftarrow t + 1$
-

3.4.2 Önerilen Bakım Yöntemleri

Önerilen yöntemlerin hesaplama ve kullanımlarına dair değerlendirilen kriterler ve uygulanma şekilleri Tablo 10'da özetlenmiştir. Bu bakım yöntemleri hem maliyetler dikkate alınmaksızın sadece bakım sayısına göre, hem de maliyetler dikkate alınarak uygulanmıştır. Bakım sayısı baz alınarak oluşturulan bakım politikalarının amacı, verilen bir planlama ufkunda minimum sayıda bakım yapılmasını sağlamaktır. Maliyetler dikkate alındığında ise amaç, en az maliyetle planlanan zaman ufkunda bakım yapmaktır. Önerilen bakım yöntemleri, planlama ufku boyunca toplam bakım sayısını veya toplam bakım maliyetini en küçükmek amacıyla bir reaktif bakım zamanında en uygun bileşen(ler)i seçmek için değişik verimlilik ölçütleri kullanılmaktadır. Bakım sayısına göre bakım yöntemleri uygulanırken, Denklem (2)–(9)'da verilen verimlilik ölçütlerindeki maliyet (Ψ_i) bölümleri veya çarpımları kullanılmamış, sadece olasılıklar üzerinden hesaplamalar yapılmıştır. İster toplam bakım sayısı ister toplam maliyet en küçükmek istensin, her bir verimlilik ölçütüne uygulanan operatör aynı kalmaktadır. Her bir ölçüt için kullanılan operatör bilgisi Tablo 10'da verilmiştir.

Tablo 10. Önerilen bakım yöntemlerinin kısa özeti

Yöntem	Zaman	Etki	Olasılık	Düğüm	Maliyet	Operatör
FEM_{fp}	Miyop bakan	Arıza etkili	En kötü durum	Bileşen	Payda	argmax
FEM_{wp}	Miyop bakan	Arıza etkili	En iyi durum	Bileşen	Pay	argmin
FEL_{fp}	İleriye bakan	Arıza etkili	En kötü durum	Bileşen	Payda	argmax
FEL_{wp}	İleriye bakan	Arıza etkili	En iyi durum	Bileşen	Pay	argmin
REM_{fp}	Miyop bakan	Değiştirme etkili	En kötü durum	Gözlem	Pay	argmin
REM_{wp}	Miyop bakan	Değiştirme etkili	En iyi durum	Gözlem	Payda	argmax
REL_{fp}	İleriye bakan	Değiştirme etkili	En kötü durum	Gözlem	Pay	argmin
REL_{wp}	İleriye bakan	Değiştirme etkili	En iyi durum	Gözlem	Payda	argmax

Arıza Etkili Miyop Bakan Yöntemler (Fault Effect Myopic-FEM_{fp}, FEM_{wp})

Bu yöntem, bir periyotta ölçülen Luvo sıcaklığı "ÇD" yani çok düşük olarak gözlemlendiğinde, o ana kadar biriktirilen kanıtlara da dayanarak bileşenlerin arıza etkili sonraki olasılıklarını (posterior probability) dikkate alır. Bu olasılıkları ve buna bağlı olarak kullanılan verimlilik ölçütlerini hesaplamak için Denklem (2) ve Denklem (3) kullanılmıştır. Bu ölçütlerden ilki kullanılırken bileşenlerin en kötü durumda olma olasılıkları hesaplanır ve sadece bakım sayısı önemseniorsa en yüksek olasılığa sahip bileşen bakım yapılmak üzere seçilir. İkinci ölçüt ise bileşenlerin en iyi durumda olma olasılığını hesaplar ve en düşük olasılığa sahip bileşeni seçer. Bakım

maliyetleri dikkate alındığında ise en az maliyetle en yüksek en kötü durumda olma olasılığına veya en düşük en iyi durumda olma olasılığına sahip bileşen seçilir. Sonraki verimlilik ölçütleri için de genellersek argmax operatörüyle çalışan ölçütlerde maliyet (Ψ_i) bölüm olarak ilgili ifadenin paydasına eklenirken, argmin operatörlerinde ifadenin payına çarpım olarak eklenir. Verimlilik ölçütlerine uygulanan operatör bilgileri Tablo 10'da özetlenmiştir.

$$ef_{it}^{FEM_{fp}} = P(C_{it} = "F" | \varepsilon \cup \{O_t = "ÇD"\}) / \Psi_i \quad (2)$$

$$ef_{it}^{FEM_{wp}} = P(C_{it} = "W" | \varepsilon \cup \{O_t = "ÇD"\}) * \Psi_i \quad (3)$$

Arıza Etkili İleriye Bakan Yöntemler (Fault Effect Look Ahead-FEL_{fp}, FEL_{wp})

Bu yöntemler de FEM yöntemleri gibi bileşenlerin arıza etkili sonraki olasılıklarını dikkate alır. Fakat bu yöntemlerde bileşenlerin, gözlem düğümünün "ÇD" olarak gözlemlendiği periyottaki değil, bundan bir sonraki periyottaki en kötü veya en iyi olma durumları göz önüne alınır. Bileşenlerin olasılık ve verimlilik ölçütü hesaplamaları Denklem (4) ve Denklem (5)'te verilmiştir.

$$ef_{it}^{FEL_{fp}} = P(C_{i,t+1} = "F" | \varepsilon \cup \{O_t = "ÇD"\}) / \Psi_i \quad (4)$$

$$ef_{it}^{FEL_{wp}} = P(C_{i,t+1} = "W" | \varepsilon \cup \{O_t = "ÇD"\}) * \Psi_i \quad (5)$$

Değiştirme Etkili Miyop Bakan Yöntemler (Replacement Effect Myopic-REM_{fp}, REM_{wp})

Bu yöntemde reaktif bakım kararı alındığında, hangi bileşene bakım yapılırsa bunun gözlem düğümünün durumunu daha iyi düzeltereğine bakılır. Sadece bakım sayısı dikkate alındığında, Denklem (6)'daki verimlilik ölçütü kullanılıyorsa gözlem düğümünü en kötü görme olasılığını en aza indiren bileşen, Denklem (7)'deki verimlilik ölçütü kullanılıyorsa gözlem düğümünü en iyi görme olasılığını en çok çıkaran bileşen bakım yapılmak üzere seçilir. Eğer bakım maliyetleri de dikkate alınıyorsa, bu ölçütlere ek olarak bileşenlerin en düşük maliyete sahip olmasına da bakılır.

$$ef_{it}^{REM_{fp}} = P(O_t = "ÇD" | \varepsilon \cup \{A_{it} = "1"\}) * \Psi_i \quad (6)$$

$$ef_{it}^{REM_{wp}} = P(O_t = "Normal" | \varepsilon \cup \{A_{it} = "1"\}) / \Psi_i \quad (7)$$

Değiştirme Etkili İleriye Bakan Yöntemler (Replacement Effect Look Ahead-REL_{fp}, REL_{wp})

Bu yöntem REM yöntemleriyle çok benzerdir fakat bu sefer bir bileşen, bir zaman diliminde

değiştirildiğinde, bunun bir sonraki periyotta gözlem düğümü üzerindeki etkisine bakılır. Yöntemlerin verimlilik ölçütleri Denklem (8) ve Denklem (9)'da verilmiştir.

$$ef_{it}^{REL_{fp}} = P(O_{t+1} = \text{“ÇD”} | \varepsilon \cup \{A_{it} = \text{“1”}\}) * \Psi_i \quad (8)$$

$$ef_{it}^{REL_{wp}} = P(O_{t+1} = \text{“Normal”} | \varepsilon \cup \{A_{it} = \text{“1”}\}) / \Psi_i \quad (9)$$

3.4.3 Normalleştirme Prosedürü

Toplam bakım maliyetine göre karşılaştırma yaparken, önerilen tüm yöntemlerin amacı, bileşenlerin bakım maliyetiyle yöntemdeki olasılık hesaplamaları arasında bir denge sağlamaktır. Fakat, iki ölçü birlikte değerlendirilirken, farklı aralıklara ve dolayısıyla farklı minimum-maksimum değerlerine sahip olmaları nedeniyle, sonuç üzerinde birinin diğerinden daha fazla egemen olması olası bir sorundur. Bu projede her bir yöntemin verimlilik ölçütü hesaplanırken bileşenlerin hem sonraki olasılıkları hem de bakım maliyetleri ele alınmıştır. Bakım maliyetleri 27.000 TL ile 151.600 TL arasındadır ve bu da maks-min oranının 5,615 olması demektir. Öte yandan, hesaplanan sonraki olasılıkları için maks-min oranı en az 1 olup, üst sınırı hesaplanan değerlere bağlı olarak çok değişkenlik göstermektedir. Olasılıkların maks-min oranı yeterince yüksek değilse, yani maliyetlerin maks-min oranından düşükse, bakım maliyeti en düşük olan bileşen en etkili bileşen olarak seçilir.

Rulman gibi daha düşük maliyetli bileşenlerin haksız olarak bakım yapılmak üzere daha fazla seçilmesini önlemek amacıyla, Denklem (10)'da verilen normalleştirme prosedürüyle bileşenlerin maliyetleri bir t anındaki sonraki olasılıkları ile aynı aralığa getirilmektedir.

$$\Psi_i \mapsto \frac{P_{maks} - P_{min}}{\Psi_{maks} - \Psi_{min}} \times (\Psi_i - \Psi_{min}) + P_{min} \quad (10)$$

Formülde P_{maks} ve P_{min} , bir t anında hesaplanan sonraki olasılıkların en yüksek ve en küçük değerlerini, Ψ_{maks} ve Ψ_{min} , bileşenlerin bakım maliyetlerinin en yüksek ve en küçük değerlerini, Ψ_i ise i . bileşene ait o zaman dilimindeki bakım maliyetini göstermektedir. Bu normalleştirme prosedürünün amacı bileşenlerin bakım maliyetlerini sonraki olasılıkların ölçeğine getirerek, bakım için seçilecek bileşene karar verilirken, iki etkenin de olabildiğince eşit bir etkiye sahip olmasını sağlayarak daha adil bir seçim ölçütü oluşturmaktır.

3.5 DBN ile Proaktif Bakım Modellemesi

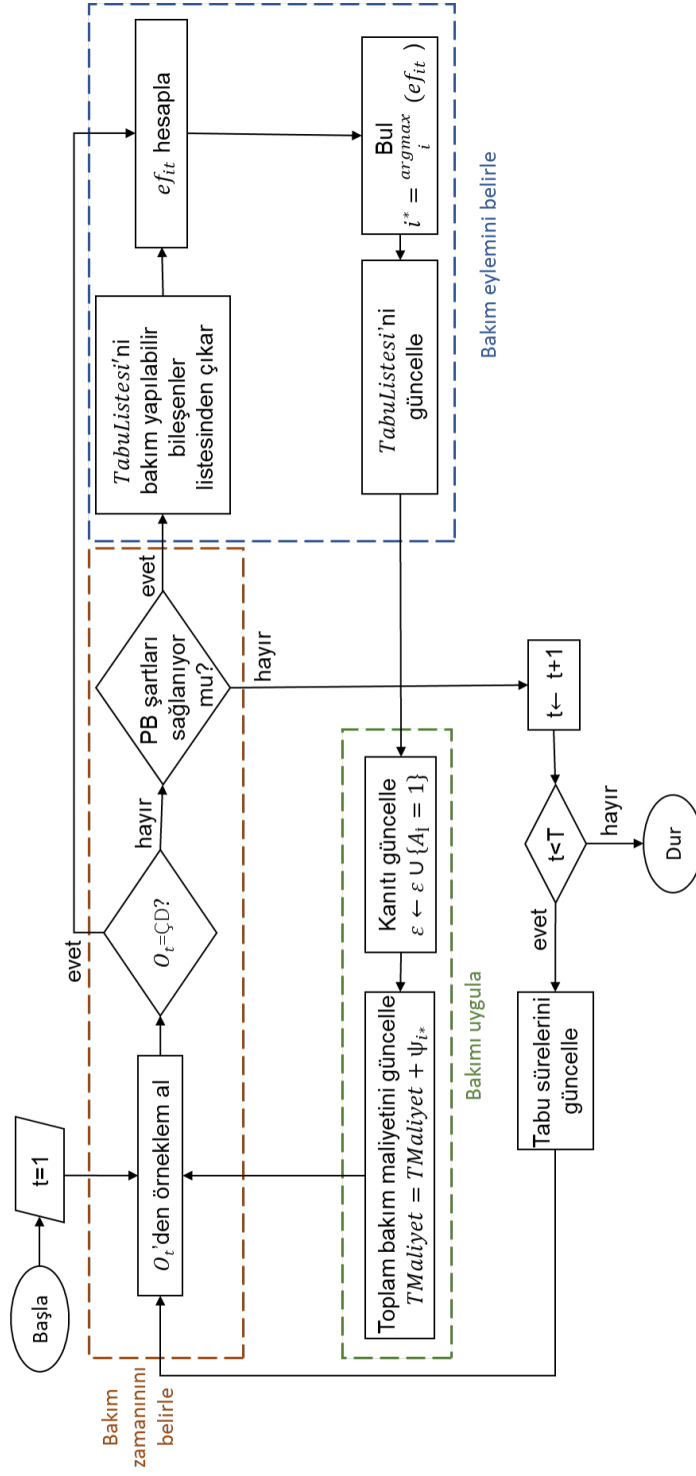
Bakım, üretimin düzenli ve maksimum kapasitede yapılabilmesini sağlayacak şekilde bir sistemi istenilen duruma getirmek için yapılan aktivitelerdir. Eğer bakım sistem bozulduğunda yapılırsa bu reaktif bakım olarak adlandırılır. Reaktif bakım sistemin o anda ayağa kaldırılması için çok önemli olsa da, sistemi sürekli aktif halde tutabilmek, beklenmeyen duruşları engellemek ve maliyeti azaltmak için proaktif bakım yapılması şarttır.

Projede önerilen proaktif bakım stratejisi için yinelemeli bir karar verme akışı genel hatları ile Şekil 10'da gösterilmektedir. Gözlem düğümü, simülasyonun başından itibaren her bir zaman aralığında örneklenir. İstenilmeyen bir durum gözlemlendiğinde, Luvo sisteminde bu durum sistemin bozulduğunu gösteren Luvo çıkış sıcaklığının “Çok Düşük (ÇD)” olması durumudur, reaktif bakım eylemleri gerçekleştirilir. Ayrıca, proaktif bakım koşullarından biri meydana geldiği zaman da bakım eylemleri proaktif olarak uygulanır. Bu koşullar şunlardır:

- Önceden planlanan sabit aralıklı bakım zamanının gelmesi,
- Dinamik olarak güncellenen dinamik aralıklı bakım zamanının gelmesi,
- Sistemin güvenilirliğinin önceden belirlenen güvenilirlik eşiğinin altına düşmesi.

Uygulanan proaktif bakım stratejisine göre bu koşullardan yalnızca biri etkindir. Proaktif bakım zamanı geldiğinde, gözlem düğümü de aynı zamanda istenilmeyen durumdaysa, “ÇD”, reaktif bakım uygulanır. Bunun nedeni, sistemdeki gözlemlerin sabahları alındığının, fakat proaktif bakımın, üretim akışının fazla etkilenmemesi için akşam saatlerine planlandığının varsayılmasıdır. Ayrıca sınırlı kaynak ayrılması dolayısıyla proaktif bakımın her bir zaman diliminde en fazla bir kere yapılabileceği varsayılmaktadır. Proaktif bakım sonrasında, aynı zaman diliminde istenmeyen başka bir gözlem alınır, reaktif bakım koşulları uygulanır. Proaktif bakımda daha çok bakım yapıldığından, proaktif bakım zamanlarında, aynı bileşenin bakım yapılmak üzere sık sık seçilmemesi için detayları Bölüm 3.5.1'de verilen bir tabu prosedürü önerilmiştir.

Proaktif bakım stratejileri önleyici ve kestirimci olarak ikiye ayrılır. Önleyici bakım beklenmeyen duruşları engellemek için düzenli aralıklarla yapılırken, kestirimci bakım için önceden belirlenen bir koşulun oluşması gerekmektedir. Literatürde, önleyici bakım da yaşa dayalı (age-based) (Huynh vd., 2012) ve blok tabanlı (block-based) (Price vd., 2000) olmak üzere alt sınıflara ayrılmıştır. Yaşa dayalı bakımda, bileşen önceden belirlenen bir yaşa geldiğinde önleyici bakım yapılır ve ilgili bileşenin yaşı sıfırlanır. Önleyici bakım zamanından önce bir arıza veya mecburiyet nedeniyle



Şekil 10. Proaktif bakım stratejisinin karar verme akışı

düzeltilici bir bakım gerekiyorsa da, bakım yapılan bileşenin yaşı yine sıfırlanır. İkincisinde ise önleyici bakım sabit zaman aralıklarıyla uygulanır ve ilkinin aksine, bu aralık iki ardışık önleyici bakım arasında düzeltilici bakıma ihtiyaç duyulsa bile değişmez. Bu çalışmada, çok bileşenli güvenilir sistemler için blok tabanlı ve yaşa dayalı stratejilerden esinlenilerek iki önleyici bakım politikası önerilmiştir. Bunlar sabit aralıklı proaktif bakım ve dinamik aralıklı proaktif bakım stratejileridir.

Önleyici stratejiler, sistemin durumunu dikkate almadan sabit veya dinamik bir aralık kullanarak belirli zaman noktalarında proaktif bakım planlar. Öte yandan, kestirimci bakımda, proaktif bakıma karar vermek için belirli bir kriter yerine getirilmelidir ve bu kriter genellikle sistemin güvenilirliği ile ilgilidir. Bu nedenle, projede bakım sürelerini uyarlamalı olarak belirlemek için eşik tabanlı bir proaktif strateji de önerilmektedir.

3.5.1 Tabu Prosedürü

Proaktif bakım sık sık yapılırsa, aynı bileşeni arka arkaya seçme durumuyla karşı karşıya kalmak mümkündür. Çünkü bu gibi durumlarda, hemen hemen tüm bileşenlerin arızalanma olasılığı düşük bir seviyede olduğundan ve neredeyse birbirinden çok da farklı olmadığından, bakım yapılacak bileşenin belirlenmesinde sonraki olasılık değerlerinden ziyade maliyet değerleri ön plana çıkmaktadır. Bu durumu önlemek için meta-sezgisel taramada iyi bilinen tabu arama algoritmasından (Gendreau ve Potvin, 2010) esinlenen bir tabu listesi tutulur. Bir bileşen bakıma tabi tutulduktan sonra bu listeye eklenir ve tabu süresi sona erene kadar proaktif olarak bakımı yapılamaz. Tabu listesi sadece proaktif bakımın başlatıldığı zaman noktalarında dikkate alınırken, düzeltilici bakım zamanında olmak tabu listesindeki bileşenlerin de seçilmesini sağlayan bir aspirasyon ölçütüdür. Proaktif bakım zamanında istenilmeyen bir gözlem alındığı için daha fazla bakıma ihtiyaç duyulursa, tabu olmayan bileşenler arasından seçim yapılır. Hem proaktif hem de düzeltilici bakım zamanlarında bileşenler verimlilik ölçütlerine göre seçilir ve tabu listesine eklenir.

3.5.2 Sabit Aralıklı Proaktif Bakım (CIPM)

Bu stratejinin amacı, planlama ufku boyunca, blok tabanlı bakıma benzer şekilde, sabit zaman aralıklarıyla proaktif bakımı planlamaktır. Sistem belirlenen sabit zamana ulaşmadan önce herhangi bir arıza meydana gelirse, proaktif bakım zamanı beklenmeden acil olarak reaktif

bakıma alınır. Böyle bir durumda, önceden belirlenmiş olan proaktif bakım programı reaktif bakım zamanına göre güncellenmez. Önleyici bakım zamanı geldiğinde tüm sistemin bakıma tabi tutulduğu blok tabanlı bakımın aksine, bu stratejide, verimlilik ölçüsüne göre seçilen sadece bir bileşene bakım yapılır. Algoritma 2, CIPM stratejisinin genel bir proaktif bakım çerçevesi içinde uygulanışını göstermektedir.

3.5.3 Dinamik Aralıklı Proaktif Bakım (DIPM)

Bu stratejide CIPM stratejisinde olduğu gibi önleyici bakımlar belirli zaman aralıklarıyla planlanır fakat bu aralıklar arasında acil bir duruma dayanan reaktif bakım yapılırsa, bir sonraki önleyici bakım zamanı, yaşa dayalı bakımdaki gibi, reaktif bakım zamanına göre güncellenir. Böylece önleyici bakım zamanları, aralarda gerçekleştirilen reaktif bakımlara göre dinamik olarak belirlenmiş olur. Burada önleyici bakım sadece bir bileşen üzerinde gerçekleştirilirken, yaşa dayalı bakımda tüm sistem onarılır. Dinamik aralıklı bir strateji geliştirilmesinin amacı, aralıklar dinamik olarak güncellenmediğinde reaktif bakımdan kısa bir süre sonra programlanabilecek gereksiz önleyici bakımları, ve böylece bakım maliyetlerini azaltmaktır. DIPM stratejisinin genel bir proaktif bakım çerçevesi içinde nasıl uygulanacağı Algoritma 2'de gösterilmiştir.

3.5.4 Eşiğe Dayalı Proaktif Bakım (ThPM)

Hem CIPM hem de DIPM, önleyici bakım stratejileridir ve sistemin durumunu dikkate almadan sabit veya dinamik bir aralık kullanarak belirli zaman noktalarında proaktif bakımı planlarlar. Proaktif bakım zamanlarını uyarlamalı olarak belirleyebilmek için, sistem güvenilirliğinin tahminini dikkate alan kestirimci bir bakım stratejisi geliştirilmiştir. Modeldeki ana süreç düğümü ile temsil edilen sistemin güvenilirliği, Luvo çıkış sıcaklığı, her zaman periyodunun başında tahmin edilir ve daha önceden belirlenen eşiğin altındaysa, o periyodun sonunda proaktif bir bakım planlanır. DIPM ve CIPM'den farklı olarak, bu strateji, sistem durumunu dikkate alarak gereksiz proaktif bakımı azaltmayı amaçlamaktadır. ThPM'nin genel proaktif bakım çerçevesinde uygulanması Algoritma 2'de verilmiştir.

Algoritma 2 Proaktif bakım sözde kodu

```
1: Girdi Strateji,  $pci, pdi, Esik, TabuSure$ 
2: if Strateji = "CIPM" then
3:   Girdi  $CIMT = [pci * 1, pci * 2, \dots, pci * \lfloor T/pci \rfloor]$ 
4: if Strateji = "DIPM" then
5:   Ayarla  $pmt = pdi$ 
6: Ayarla  $t = 1$ 
7: while  $t \leq T$  do
8:   if Strateji="ThPM" then
9:     Ayarla  $thr = Esik$ 
10:  Gözlem düğümü  $O_t$ 'den örneklem al
11:  if  $O_t \neq \text{"ÇD"}$  then
12:     $I' \leftarrow I \setminus TabuListe$ 
13:  else
14:     $I' \leftarrow I$ 
15:  while ( $(O_t = \text{"ÇD"})$  veya  $(t = CIMT(1))$  veya  $(t = pmt)$  veya  $(P(S_t = \text{"Normal"}|\varepsilon) \leq thr)$ ) ve ( $I'$  boş değilse) do
16:    if (Strateji = "CIPM") ve  $(CIMT(1) = t)$  then
17:      Güncelle  $CIMT(1) = []$ 
18:    else if Strateji = "DIPM" then
19:      Güncelle  $pmt = t + pdi$ 
20:    else if Strateji = "ThPM" then
21:      Güncelle  $thr = 0$ 
22:    Hesapla  $ef_{it} \forall i \in I'$ 
23:    Seç  $i^* = \operatorname{argmax} \{ef_{it} : i \in I'\}$  veya  $i^* = \operatorname{argmin} \{ef_{it} : i \in I'\}$  (Tablo 10'a göre)
24:     $TabuSureListe(i^*) = TabuSure$ 
25:    Güncelle  $\varepsilon \leftarrow \varepsilon \cup \{A_{i^*t} \leftarrow 1\}$ 
26:    if  $O_t = \text{"ÇD"}$  then
27:      Hesapla  $\psi_{i^*} = EM_{i^*} + DS_{i^*} * DM_{i^*}$  (Reaktif koşullar altında)
28:    else
29:      Hesapla  $\psi_{i^*} = EM_{i^*} + DS_{i^*} * DM_{i^*}$  (Proaktif koşullar altında)
30:    Hesapla  $TMaliyet = TMaliyet + \psi_{i^*}$ 
31:    Güncelle  $I' \leftarrow I' \setminus \{i^*\}$  ,
32:    Gözlem düğümü  $O_t$ 'den örneklem al
33:     $t \leftarrow t + 1$ 
34:    Güncelle  $TabuSureListe$ 
35:     $TabuListe \leftarrow \{j : TabuSureListe(j) > 0\}$ 
```

3.5.5 Önerilen Proaktif Bakım Stratejileri için Genel Algoritma

Önerilen genel proaktif bakım stratejisinin sözde kodu, uygulanacak stratejinin ve strateji parametresinin girdi olarak verildiği Algoritma 2'de gösterilmiştir. Bu genel sözde kodu, kullanılan stratejiye bağlı olarak parametrelerin başlatılması ve güncellenmesinde farklılaşır. Algoritmada, 15. satır, bakım yapılacak zamanı belirler. Gözlem düğümü "ÇD" ile sonuçlanırsa reaktif bakımı işaretler, değilse proaktif bakım stratejilerinin üç boole (boolean) operatörünün değerine bağlı olarak proaktif bakım kararı verilebilir.

Eğer CIPM kullanılıyorsa, sabit proaktif bakım zamanları CIMT listesinde tutulur. Bu süre gelip de proaktif bakım gerçekleştirildiğinde, bu listenin ilk ögesi silinir. DIPM kullanılıyorsa, dinamik proaktif bakım aralığı (pdi) algoritmaya girdi olarak verilir. Sonraki proaktif bakım zamanı, mevcut döneme bu aralık eklenerek güncellenir. Böylece, CIPM stratejisindeki önceden belirlenmiş statik proaktif bakım zamanlarından farklı olarak DIPM stratejisinde proaktif bakım zamanları önceki bakımların zamanlarına bağlı olarak dinamik bir şekilde belirlenir. ThPM uygulandığında, giriş parametresi olarak bir eşik seviyesi tanımlanır. Sistem güvenilirliği bu değer altına düştüğünde proaktif bakım yapılır. Bir zaman periyodunda proaktif bakım en fazla bir kere yapılabilir diye varsayıldığından, bu stratejiye göre bakım yapıldıktan sonra birden fazla proaktif bakım yapılmasından kaçınmak için sistem güvenilirliğinin karşılaştırıldığı eşik seviyesi sıfıra güncellenir.

Gözlem düğümünden örneklem alındıktan sonra, reaktif bakım gerekirse, bakım yapılabilir bileşenler kümesi, I' , tüm bileşenleri içerir. Aksi takdirde, tabu listesinde olmayan bileşenlerden oluşur. Gözlem düğümü “ÇD” durumundaysa, proaktif bakım koşulları yerine getirilmiş olsa da (CIMT listesinin ilk ögesi t zamanına eşittir, dinamik proaktif bakım süresi gelmiştir veya sistem güvenilirliği eşığın altındadır), reaktif bakım uygulanır. Proaktif bakım zamanı gelmişse ve gözlem düğümü “ÇD” değilse proaktif bakım stratejilerinden biri uygulanır. Her iki durumda da, bakım yapılacak bileşen Bölüm 3.4.2’de sunulan sekiz yöntemden birine göre belirlenir ve bu bileşen tabu listesine eklenir.

Bileşenlerin proaktif ve reaktif bakım maliyetleri farklı olduğundan, iterasyon maliyeti (ψ_{i^*}), gözlem “ÇD” durumundaysa reaktif bakım maliyeti değerleri kullanılarak, aksi takdirde proaktif bakım maliyeti değerleri ile hesaplanır. Toplam maliyet, iterasyon maliyeti eklenerek güncellenir. Her bakımdan sonra, bakım yapılan bileşen bakım yapılabilir bileşenler listesinden çıkarıldığından, o periyotta yeniden bakım yapılması gerekiyorsa, güncellenmiş bakım yapılabilir bileşenler listesinden başka bir bileşen seçilir.

Bir bileşenin bakımı yapıldığında, bir sonraki proaktif bakım zamanında aynı bileşenin seçilmesini önlemek için bileşen *TabuListe*’sine eklenir. *TabuSureListe*, *TabuListe*’sindeki tüm bileşenlerin tabu süresini tutar. Her periyot sonrasında bileşenlerin tabu süresi güncellenir. Örneğin, tabu süresi 5 periyot olarak belirlendiyse, bir bileşen tabu listesine ilk girdiğinde, *TabuSüreListe* içindeki değeri 5 olur ve bir sonraki periyotta 4’e düşürülür. Bileşenin *TabuSureListe*’sindeki tabu süresinin değeri 0’a düştüğünde, bileşen *TabuListe*’den çıkarılır.

3.6 POMDP ile Durum Bazlı Bakım Modellemesi

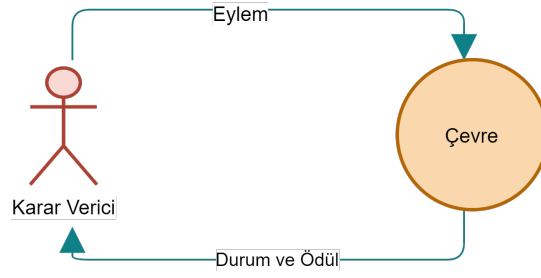
Durum bazlı bakım, proaktif bir bakım stratejisi olup, bakım kararlarının sistemin ve/veya bileşenlerinin durumlarını gözlemleyerek belirlendiği karar verme stratejisidir. Sistemin durumu, sürekli izlenen ve o sisteme veya uygulamaya özel parametrelerle ölçümlendirilir. Diğer bir deyişle, durum bazlı bakım, cihazın üzerinde ölçülen değerlere veya ürettiği ürünlerde yapılan ölçümlere göre karar verilen bakım yapma stratejisidir. Durum bazlı bakımda sıralı karar süreçleri kullanılır. Sıralı karar süreçleri, yöneylem araştırması, yapay zeka, bakım ve robotik uygulamalarını içeren geniş bir çalışma alanıdır. Bir karar verme sürecinde, en iyi çıktı amaçlanarak çeşitli alternatifler arasından bir eylem seçilir. Fakat seçilen eylem sonrasında eylemin etkileri kesin olarak bilinmiyorsa bu tarz problemler “Belirsizlik Altında Karar Verme Süreci” olarak tanımlanır. Sıralı karar süreçlerinin en sık kullanılan modelleri MDP’ler ve POMDP’lerdir.

3.6.1 Markov Karar Süreçleri (MDP’ler)

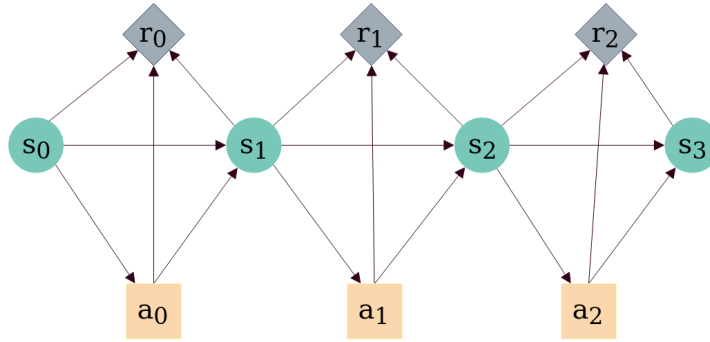
Bir sıralı karar verme sürecinde anlık ödülleri düşünerek karar vermek yerine bu kararların sonraki zaman dilimlerinde yaratacağı etkiler de göze alınmalıdır. Fakat eylemlerin etkileri de belirsizlik içerdiğinden, bu tarz problemleri modellemek için MDP’ler önerilmiştir. Markov karar süreçleri, Markov zincirlerinin, bir dizi karar, eylem ve durum bazlı ödül ve maliyet yapısı ile genişletilmiş halidir (Braziunas ve Boutilier, 2004). Bir MDP modelinde, karar vericinin çevre ile etkileşimi Şekil 11’de verilmiştir. MDP’lerde, karar vericinin mevcut durumu, her zaman kesin olarak bilinir; fakat temsilcinin eylemlerinin etkileri ile ilgili belirsizlikler bulunmaktadır. Karar verici, herhangi bir zamanda, t , mevcut durum s_t ’i (durum seti S ile gösterildiğinde, $s_t \in S$) gözlemlemesinin ardından eylem seti A ’dan bir a_t eylemini seçtiğinde, mevcut durum ve seçilen eyleme bağlı olarak anlık bir r_t ödülü (kazanç veya maliyet) ortaya çıkmaktadır. Tipik bir MDP modeli Şekil 12’de verilmiştir.

Bir MDP modeli $\langle S, A, T, R \rangle$ yapısı ile tanımlanır. S , sistemin durum setini; A , eylemler setini; T , geçiş fonksiyonunu; R , iki ardışık zaman arasındaki toplam ödül fonksiyonunu gösterir.

- **Durumlar Seti:** S , sistemin durumlar setidir. Bir durum, ufkun herhangi bir noktasında çevrenin tanımıdır. Durumlar arasındaki ilişki Markovian’dır. Bir sürecin Markovian olması, yani Markov özelliğine sahip olması, gelecek durumların geçmiş durumlardan bağımsız, yalnızca mevcut duruma bağlı olmasını gerektirir.
- **Eylemler Seti:** A , seçilebilecek tüm alternatif eylemlerin setidir.



Şekil 11. Bir karar vericinin MDP modelinde çevre ile etkileşimi



Şekil 12. Tipik bir MDP modeli

- **Geçiş Fonksiyonu:** $T : S \times A \times S \rightarrow [0, 1]$ sürecin geçiş olasılıklarının fonksiyonudur. Mevcut durum s ve seçilen eylem a bilindiğinde, s' durumuna muhtemel tüm geçiş olasılıklarını veren fonksiyondur.
- **Ödül Fonksiyonu:** $R(s, a, s') : S \times A \times S \rightarrow \Delta(R)$ durum geçişlerine ve eylemlere bağlı ödülleri hesaplayan fonksiyondur.

Bir MDP modelinde sonlu ufuklu ve sonsuz ufuklu olmak üzere iki performans kriteri vardır. Sonlu ufuklu performans kriteri, belirlenmiş sonlu zaman ufuklu MDP modelleri için kullanılırken, bir zaman ufku yoksa sonsuz ufuklu performans kriteri kullanılır. Sonlu ufuklu durumlarda, optimal ve durağan olmayan bir politika varken, sonsuz ufuklu durumlarda optimal durağan bir politika vardır. Sonlu ufuklu problemlerde, değer fonksiyonu ve optimal değer sırasıyla Denklem (11) ve

Denklem (12)'deki gibi hesaplanır (Bernstein, 2005):

$$V^\pi(s) = E \left[\sum_{t=0}^T \gamma^t R(s_t, a_t) \right] \quad (11)$$

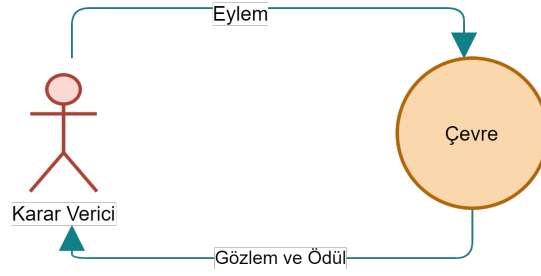
$$V^*(s) = \max_{\pi} \{V^\pi(s)\} \quad (12)$$

Sonsuz ufuklu problemlerde, Denklem (11)'deki planlama ufku, T , ∞ 'a ayarlanır. Burada π , politikayı, $V^\pi(s)$, s durumu ile başlayan π politikasının değer fonksiyonunu, $V^*(s)$ de s durumu ile başlayan stokastik sürecin optimal ödül toplamını ifade etmektedir. Ayrıca, $\gamma \in [0, 1]$, bir sabit olup periyotluk indirim (discount) faktörüdür. İndirim faktörünün amacı gelecekteki ödülleri şimdiki değere taşımaktır, böylece sonsuz ufuklu problemlerde ödül toplamının değerinin sonlu olması garanti edilir.

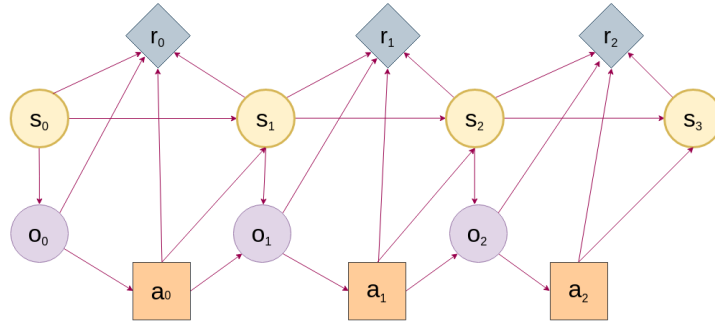
3.6.2 Kısmen Gözlemlenebilir Markov Karar Süreçleri (POMDP'ler)

MDP'ler, çok yönlü, durağan olmayan politikalar üretebilme yetenekleri ve global optimum arayışlarında problemsiz sonuç veren özel yapılarına karşın, belirsizliğin olduğu modellerde konusunda sınırlı sonuçlar vermektedirler (Papakonstantinou ve Shinozuka, 2014a). Bu sebeple, MDP'ler, bilgi maliyetini hesaba katabilecek, belirsizlik altında optimum politikaların planlanması problemlerinde daha iyi sonuçlar veren stokastik modellere dayanan kısmen gözlemlenebilir Markov karar süreçlerine (POMDP'ler) genişletilmişlerdir. POMDP'ler, sistemin durumunun direkt gözlemlenemediği, fakat gözlemler ile tahmin edilebildiği genişletilmiş MDP'lerdir. POMDP'ler özellikle belirsizlik altında ardışık karar verme modelleri için oldukça güçlü araçlardır. Karar vericinin POMDP modelinde çevre ile ilişkisi Şekil 13'te gösterilmiştir. MDP'lerden farklı olarak, POMDP modellerinde karar verici, içinde bulunduğu durumu tam olarak gözlemleyemez. Ancak karar verici, mevcut durumu ile yaptığı eylemden sonra olabileceği durumlarda olma olasılığını bilir. Bu olasılara "inanç durum olasılıkları" denir. Ek olarak, karar verici, bir eylem yaptığında, yani bir diğer inanç durumuna geçtiğinde, bir gözlem elde eder. Bu gözlem, bir sonraki aşamada inanç durum olasılıklarını etkiler. Diğer bir deyişle, karar verici bu gözlemlerle bir sonraki durum için ipucu elde etmiştir.

Tipik bir POMDP modeli Şekil 14'te verilmiştir. Herhangi bir t zamanında s_t , sistemin durumunu; a_t , seçilen eylemi; o_t , sistemden alınan gözlemi; r_t , t ve $t + 1$ zamanları arasında gerçekleşen ödülü gösterir.



Şekil 13. Bir karar vericinin POMDP modelinde çevre ile etkileşimi



Şekil 14. Tipik bir POMDP modeli

Bir POMDP modeli $\langle S, A, \Theta, T, O, R \rangle$ yapısı ile tanımlanır.

- **Durumlar Seti:** S , sistemin durumlar setidir. Bir durum, ufkun herhangi bir noktasında çevrenin tanımıdır. Durumlar arasındaki ilişki Markovian'dır. Bir sürecin Markovian olması, yani Markov özelliğine sahip olması, gelecek durumların geçmiş durumlardan bağımsız, yalnızca mevcut duruma bağlı olmasını gerektirir.
- **Eylemler Seti:** A , seçilebilecek tüm alternatif eylemlerin setidir.
- **Gözlemler Kümesi:** Θ , karar vericinin gözlemleyebileceği tüm muhtemel gözlemlerinin kümesidir.
- **Geçiş Fonksiyonu:** $T : S \times A \times S \rightarrow [0, 1]$ sürecin geçiş olasılıklarının fonksiyonudur. Mevcut durum s ve seçilen eylem a bilindiğinde, s' durumuna muhtemel tüm geçiş olasılıklarını veren fonksiyondur.

- **Gözlem Fonksiyonu:** $O : S \times A \times \theta \rightarrow \Delta(O)$ sürecin durumu ve yapılan eyleme bağlı gözlemlerin olasılıklarının fonksiyonudur. Karar vericinin, mevcut durumundan bir eylem yaparak geçtiği yeni durumda, her bir gözlemi elde etme olasılığını verir.
- **Ödül Fonksiyonu:** $R(s, a, o, s') : S \times A \times O \times S \rightarrow \Delta(R)$ durum geçişlerine, eylemlere ve gözlemlere bağlı ödülleri hesaplayan fonksiyondur.

3.6.3 İnanç-Durum MDP'leri

Karar verici, doğrudan çevre durumunu gözlemleyemez ancak bazı gözlemler ile tahmin etmeye çalışır. Yani, karar vericinin mevcut durum üzerinde bir inancı vardır. Karar verici, tüm kararlarını elindeki eksik, yetersiz, kısmi bilgiye göre vermelidir. Karar verici, geçmişte yaptığı tüm gözlemleri ve yaptığı eylemleri hatırlar. Buna “tüm geçmiş” denir ve zamanla genişlediğinden bunu işlemek ve saklamak zordur. Tüm geçmişi saklamak yerine, “inanç durumu”, $b(s)$, denen ve olası her süreç durumuna olasılıklar atayan ve bu olasılıkları saklayan bir alternatif geliştirilmiştir. İnanç durumunun, durum uzayı üzerinden düzgün güncellenen bir olasılık dağılımı ile tüm geçmiş optimallikten ödün vermeden özetlemek için yeterli olduğu kanıtlanmıştır (Aström, 1965). Bir başka deyişle, inanç durumu, karar vericinin mevcut duruma ait bilgisini özetler ve bu, karar vericinin tüm geçmişe erişim imkanı olsaydı bulacağı politikanın aynısını elde etmesi için yeterlidir. Böylece POMDP'ler ayrık durum uzayı yerine olasılık değerleri içeren sürekli bir uzaya geçerek sürekli-durum MDP'sinin özel bir durumu olan “inanç-durum MDP'leri” haline gelmektedirler. Her bir adımda, karar verici bir eylem gerçekleştirir, buna göre ödüllendirilir. İnanç durumu, Bayes kuralı kullanılarak Denklem (13) ile güncellenir.

$$\begin{aligned}
b'(s') &= P(s'|o, a, b) \\
&= \frac{P(o|s', a, b)P(s'|a, b)}{P(o|a, b)} \\
&= \frac{P(o|s', a) \sum_{s \in S} P(s'|a, b, s)P(s|a, b)}{P(o|a, b)} \\
&= \frac{O(s', a, o) \sum_{s \in S} T(s', a, s)b(s)}{P(o|a, b)}
\end{aligned} \tag{13}$$

Bu ifadeye T , a eylemini gerçekleştirdikten ve o gözlemini elde ettikten sonra mevcut b inancından sonraki b' inancına geçiş olasılığı fonksiyonudur. $P(o|a, b)$ koşullu olasılığı, normalleştirme amacıyla kullanılır. Tüm inançların kümesi, inanç uzayını, B , oluşturur.

POMDP değer fonksiyonu V , π politikası için beklenen ödülü temsil eder. Her bir inanç için, V^* , karar vericinin π^* optimal politikasını uygulaması ile toplamayı beklediği değerdir ve Denklem (14) ile hesaplanır .

$$V^*(b) = \max_{a \in A} \left\{ \sum_{s \in S} R(s, a) b(s) + \gamma \sum_{o \in \theta} \sum_{s \in S} P(o|s, a) b(s) V^*(b') \right\} \quad (14)$$

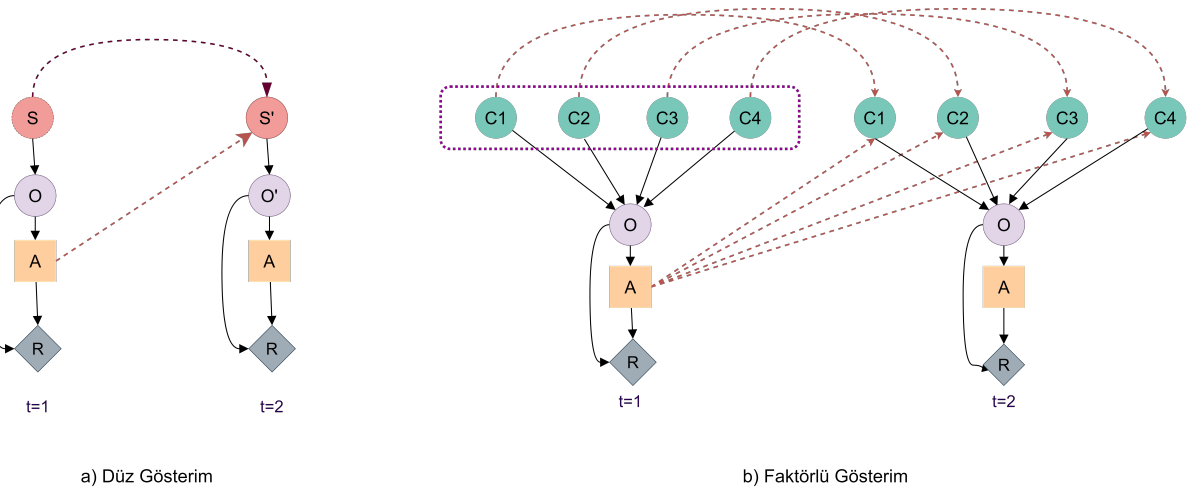
Değer fonksiyonu, inanç uzayı üzerinde hesaplanır. İnanç uzayı süreklidir; fakat sonlu bir ufuk için optimal değer fonksiyonunun parçalı doğrusal ve dışbükey olması özelliği kullanılır. Böylece, herhangi bir sonlu ufuk çözümü sınırlı bir α -vektör kümesi ile temsil edilir. α -vektörler, inanç fonksiyonunu tanımlayan bir dizi hiperdüzlemlerdir. Her bir inanç noktasında, değer fonksiyonu, en yüksek değere sahip olan hiperdüzleme eşittir. Değer fonksiyonu, Denklem (15) ile inanç uzayı üzerinde hesaplanır. Bu ifadede $b(s)$, inanç durumunu ifade ederken; $\alpha(s)$, α -vektörlerini göstermektedir.

$$V(b) = \max_{\alpha} \left\{ \sum_s \alpha(s) b(s) \right\} \quad (15)$$

3.6.4 Faktörlü POMDP'ler

Klasik POMDP temsil biçiminde sistem, Şekil 14'de görüldüğü, çoklu durumu olan bir tek düğüm ile temsil edilir. Gerçek dünyada uygulanan çok bileşenli POMDP modellerinde ise tek bir sistem durumu yerine, bileşenleri ayrı ayrı temsil eden çoklu sistem düğümleri kullanılması gerekebilmektedir. Durum ve inanç uzaylarının karmaşıklığını hafifletmek için literatürde yeni yaklaşımlar önerilmiştir (Poupart, 2005). Büyük boyutlu durum uzayları olan problemler için, çeşitli teknikler bu fonksiyonları kompakt bir şekilde temsil etmemizi sağlar. POMDP'lerde kesin veya yaklaşık çözüme ulaşmak için faktörlü gösterimler ve bunlar için geliştirilmiş çözüm yöntemlerinden karar ağaçları (Decision Tree - DT) (Boutilier ve Poole, 1996) veya cebirsel karar diyagramları (Algebraic Decision Digram - ADD) (Hansen ve Feng, 2000) önerilmiştir. Şekil 15'te solda düz gösterim ile tipik bir POMDP yapısı, sağda ise faktörlü gösterim ile faktörlü bir POMDP yapısı gösterilmiştir.

Daha önce bahsedildiği gibi POMDP'ler için iki temel hesap zorluğu vardır. Boyutluluk zorluğu (curse of dimensionality) (Pineau vd., 2004) büyük durum uzaylarıyla başetme sorunudur ve geçmiş zorluğu (curse of history) (Pineau vd., 2004) ise, politika ve değer fonksiyonunun üstel karmaşıklığı olarak tanımlanır. Ölçeklendirilebilir POMDP algoritmaları yalnızca inanç, eylem ve



Şekil 15. Düz ve Faktörlü POMDP için iki zaman dilimli gösterim

gözlem uzaylarının niceliğinin katlanarak artmadığı durumlarda, yani yukarıda bahsedilen iki sorun çözüldüğü zaman oluşturulabilir. Nokta-temelli yaklaşımlar, temel olarak boyutluluk sorununu, yalnızca seçilen inanç noktası alt kümesinde yapılacak değer fonksiyonu güncellemelerini sınırlayarak ele almaktadır. Bununla birlikte, az sayıda duruma sahip POMDP'ler için bile, optimal değer fonksiyonları ve α -vektör sayısı üstel olarak artıyor olabilir. Böylece “geçmiş sorunu” yine önemli bir problem olarak karşımıza çıkmaktadır (Poupart, 2005).

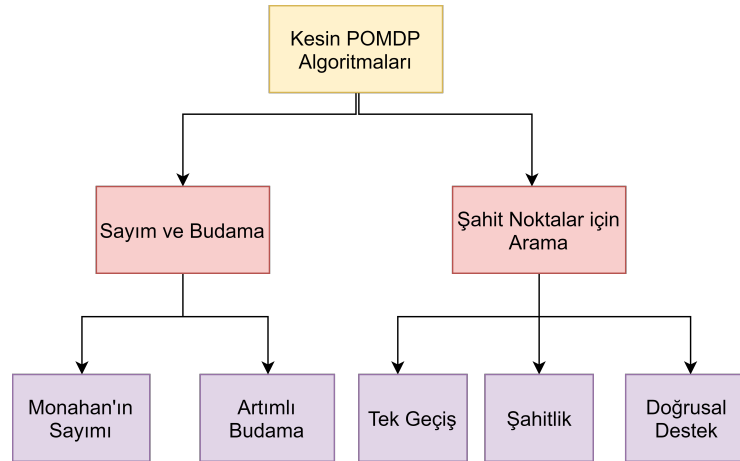
Nokta-bazlı değer yinelemesi yaklaşımına, politikaları ve değer fonksiyonlarını kompakt bir şekilde temsil etmek için bir araç olarak cebirsel karar diyagramlarını entegre etmek bu problemlerle başatmenin yollarından biridir. Faktörlü modeller ise POMDP bileşenlerini verimli bir şekilde temsil edebilir ve yedekleme iterasyonlarında vektörlerde gerçekleştirilen çeşitli cebirsel işlemlerin hesaplama karmaşıklığını azaltabilir. Büyük boyutlu durum uzayları olan problemler için boyutluluk azaltma, karar ağaçları veya cebirsel karar diyagramları gibi kompakt veri yapısı gösterimlerinden yararlanılarak etkili bir şekilde yapılabilir

Cebirsel bir karar diyagramı (ADD) (Hansen ve Feng, 2000), ikili karar diyagramlarının (Binary Decision Diagrams) bir uzantısıdır. Dalların (branch) birleşmesini sağlayan ikili karar diyagramları, karar ağaçlarının kompakt bir gösterimini sağlar. ADD'ler, rassal değişkenlerin koşullu ve bağlama-özgü bağımsızlığı (conditional and context-specific independence of random variables) ve fonksiyonların toplamsal ayrılabilirliği (additive separability of functions) özelliklerini kullanarak vektörlerin veya matrislerin özdeş girişlerini toplayarak (aggregating) kompakt sunum sağlarlar. Böylece, POMDP'deki olasılık ve fayda (utility) tablolarının kompakt gösterime kadar küçülmeleri

sağlanır. Ek olarak, bir POMDP'nin ödül fonksiyonu, genellikle *toplamsal ayrılabilirlik* (*additive separability*) ve *bağlama-özü bağımsızlık* (*context-specific independence*) kullanarak kompakt bir şekilde temsil edilebilir. ADD kullanmanın asıl yararı, temel aritmetik işlemlerin performansının daha verimli hale gelmesidir, çünkü tüm özdeş varlıklar operasyona yalnızca bir kez katılır. Çok sayıda benzer değer olmadığı durumlarda, ADD benzer girişleri toplayarak sıkıştırılabilir. Bu, ADD'nin boyutunun sınırlı kalmasını sağlar. ADD tabanlı algoritmaların düz yapılarda çalışan algoritmalarından daha iyi ölçeklendirildiği gösterilmiştir (St-Aubin vd., 2001).

3.6.5 POMDP Kesin Çözüm Yaklaşımları

Kesin algoritmalarda, bütün inanç uzayı için tüm α -vektörler bulunur. Ciddi bir hesaplama ve zaman maliyeti gerektirdiği için, büyük ölçekli problemlerde kesin algoritmaların kullanılması zorludur. Sonlu ufuklu problemler için optimal politikalar bulmak PSPACE-complete bir problemdir (C. Papadimitriou ve Tsitsiklis, 1987). Sonsuz ufuklu problemler için ise optimal politikaların varlığına karar verilemez (Madani vd., 1999). POMDP'lerin çözümünde kullanılan kesin algoritmalar Şekil 16'da sınıflandırılmıştır.



Şekil 16. Kesin POMDP çözüm yaklaşımlarının sınıflandırması

• Sayım ve Budama

Monahan'ın Sayım Algoritması (Monahan's Enumeration Algorithm) (Monahan, 1982), inşa edilebilecek tüm olası α -vektörleri üretmek ve yararsız olanları ortadan kaldırmak üzerine kuruludur. Her iterasyonda çok fazla vektör üretilir, bu nedenle budama gerektirir.

Durum uzayında diğerlerine kıyasla baskın vektörler vardır. Bütün vektörler için hesap yapmaktansa budama yöntemi ile baskın olmayan vektörlerin elenmesi söz konusudur. Bu sebeple çok ciddi bir hesaplama zorluğu altına girilmektedir.

Artımlı Budama Algoritması (Incremental Pruning Algorithm) (Cassandra vd., 1997; Zhang ve Liu, 1996) ise literatürde diğer kesin algoritmalara göre yeni sayılabilecek bir algoritmadır. Monahan'ın sayım algoritması (Monahan, 1982) ile aşağıda detaylı olarak açıklanacak olan şahitlik algoritmalarının birleştirilmesi fikrinden doğmuştur. Şahitlik algoritmaları gibi, her eylem için ayrı ayrı vektör setleri oluşturulur ve sonra her bir gözleme aynı anda odaklanılır. Ana fikri bütün bölge ile uğraşmamaktır. Vektör setlerinin oluşumu yönteminde şahitlik algoritmasından ayrılır. Bu algoritmanın değer fonksiyonlarının geometrisini daha iyi kullanabilen daha karmaşık bazı genellemeleri vardır (Cassandra vd., 1997).

• **Şahit Noktalar için Arama**

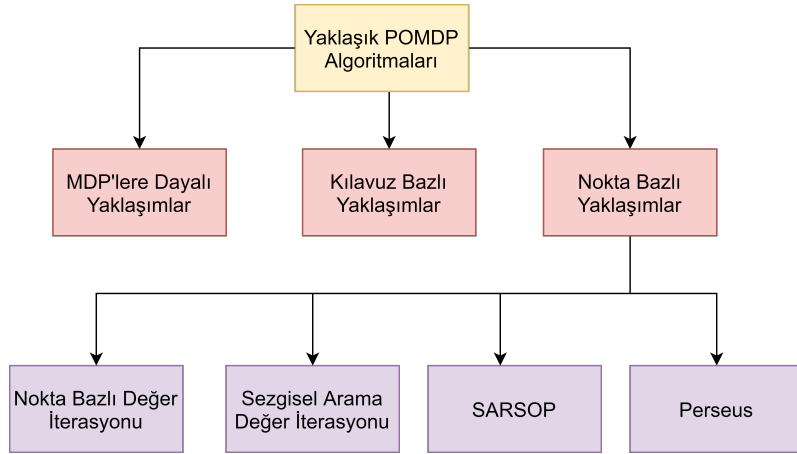
Tek Geçiş Algoritması (One Pass Algorithm) (Smallwood and Sondik, 1973) ile sonlu ufuklu problemlere kesin çözümler, sonsuz ufuk problemlere ise yaklaşık çözümler üretilir. Keyfi bir inanç noktasıyla başlanır, bu nokta için vektör oluşturulur ve sonra bu vektörün baskın olduğu garanti edilen inanç uzayı üzerindeki bir dizi kısıtlamayı tanımlanır. Ancak, Sondik'in algoritması tarafından tanımlanan bölgeler son derece muhafazakârdır. Vektörün baskın olduğu bölge tam olarak bilinmemektedir. Böylece birçok inanç noktası için aynı vektör oluşturulabilir.

Şahitlik Algoritması (Witness Algorithm) (Cassandra vd., 1994) ile problem başka bir boyuttan ele alınır. Sondik (1971) ve Cheng (1988) ile aynı temel yapıyı kullanarak bir vektör için bölgeleri tanımlar ve bu vektörün baskın olmadığı bir nokta arar. Sondik (1971)'ten ayrılan yönü, tüm eylemleri birleştirmez, her eylem için ayrı ayrı en iyi değer fonksiyonunu bulmaya odaklanır. Değer fonksiyonlarını bulduktan sonra onları nihai değer fonksiyonunda birleştirir. Bir başka özelliği ise bir tek zamanda bir tek gözlem yapmasıdır. (Cheng, 1988)'de olduğu gibi şahitlik algoritması da rastgele bir inanç noktası ile başlar ve o noktanın vektörünü üretir. Bu vektörü bir kümeye ekler ve bu kümenin V' olduğunu varsayar, daha sonra bu setin gerçekten V' olup olmadığını kanıtlamaya veya çürütmeye çalışır.

Doğrusal Destek Algoritması (Linear Support Algorithm) (Cheng, 1988), Sondik (1971)'in fikrini esas alır, ancak daha az katı kısıtlamalar tercih eder. Eylemlere ve gelecekteki eylem planlarına odaklanmayı unutmaz. Sadece rastgele bir nokta seçer ve o noktanın vektörünü üretir. Bu vektörü bir kümeye ekler ve bu kümenin V' olduğunu varsayar, daha sonra bu setin gerçekten V' olup olmadığını kanıtlamaya veya çürütmeye çalışır. Sondik'in tek geçiş algoritmasına göre daha efektif sonuçlar verir.

3.6.6 POMDP Yaklaşık Çözüm Yaklaşımları

Yaklaşık algoritmalarda, inanç uzayının alt kümesinde hızlı ve büyük problemelerle başa çıkabilecek α -vektörler bulunur. Yaklaşık algoritmalar, her zaman hızlı bir şekilde optimal sonuca yaklaşacaklarını garanti etmezler (Lusena vd., 2001). Fakat çoğu zaman, makul bir zaman ve maliyetle optimal çözüme yaklaşırlar. POMDP'lerin çözümünde karmaşıklık problemini ele almak için, değer fonksiyon yaklaşımları (value function approximations) ve politika yaklaşımları (policy approximations) olmak üzere sezgisel yaklaşımlar geliştirilmiştir. Değer fonksiyonu yaklaşımları, optimal değer fonksiyonunu yaklaşık alır, ve yeni fonksiyonun daha düşük karmaşıklığa sahip olmasını ve kesin çözüme göre daha kolay hesaplanmasını sağlar. Değer fonksiyonu yaklaşımlarının garantili kesinliği yoktur, ancak çoğu durumda üst ve alt sınırlar verir. Politika yaklaşımlarında ise, tüm politika uzayını aramak yerine, en iyi çözümü veya iyi bir yaklaşımını içerdiğine inanılan alt uzaylarda arama yapılarak politikaları yinelenmeye, geliştirmeye dayanır. POMDP'lerin çözümünde kullanılan belli başlı yaklaşık algoritmalar Şekil 17'de sınıflandırılmıştır.



Şekil 17. Yaklaşık POMDP çözüm yaklaşımlarının sınıflandırması

• MDP ve Q Fonksiyonlarına Dayalı Yaklaşımlar

Bu yöntemler, MDP politikalarının hesaplanması daha kolay olduğu için, temeli MDP'ye dayanan sezgisel değer fonksiyonu yaklaşımlarının kullanılması fikrini esas alırlar. Genel olarak bu yöntemler kısmi gözlemlenebilirliği ihmal eder ve tam gözlemlenebilirlik varsayarlar. Bu yaklaşımlardan en popülerleri Büyük Olasılıklı Durum (Most Likely State - MLS) (Cassandra vd., 1996), QMDP (Littman vd., 1995b) ve Hızlı Bilgilendirilmiş Sınır (Fast

Informed Bound - FIB) (Hauskrecht ve Fraser, 2000) yöntemleridir. MDP politikası, POMDP'ye uygulandığında optimalliği garanti etmez; ama yine de geçerli bir sezgisel tahmin olarak kullanılabilir. Çünkü temelde MDP inancı, POMDP stokastiğini basitleştirilmiş olarak yansıtabilir. MLS sezgisel yöntemi, şu anki inancında, en olası sistem durumu için en iyi olan eylemi yürütmek suretiyle Denklem (16) ile bir politika dizayn eder.

$$\pi_{MLS}(b) = \operatorname{argmax}_{a \in A} \left\{ Q_{MDP}^* \left(\operatorname{argmax}_{s \in S} \{b(s)\}, a \right) \right\} \quad (16)$$

Bu yaklaşım, en iyi performansına, inanç dağılımında (belief distribution) öncü durum (leading state) olduğu zamanlarda ulaşır. Karar vericinin doğru sensörlere erişimi varsa, bu çok muhtemeldir. Sensörlerden gelen bilginin çok yüksek olasılıkla doğru olduğu durumlarda bu çok olasıdır. Aynı zamanda, inanç durumunda düşük bir kesinlik olması durumunda, bu yaklaşımın güvenilir bir politika üretmesinin mümkün olmadığı anlamına gelir. MDP'ye dayanan başka bir sezgisel varyantı ise biraz daha karmaşık olan QMDP'lerdir. Bu sezgiselde, Q fonksiyonlarıyla birlikte değer fonksiyonuna yaklaşılır. Bir zamanda bütün inanç uzayı için her eyleme tek bir α -vektörü Denklem (17) ile seçilir. Politika, inanç durum olasılık dağılımı üzerinde ağırlıklı toplamı dikkate alarak Denklem (18) ile oluşturulur.

$$\alpha^a(s) = Q_{MDP}^*(s, a), \forall a \in A \quad (17)$$

$$\pi_{QMDP}(b) = \operatorname{argmax}_{a \in A} \left\{ \sum_{s \in S} b(s) Q_{MDP}^*(s, a) \right\} \quad (18)$$

Politika, inanç durumu olasılık dağılımına göre ağırlıklı toplam dikkate alınarak geliştirilmiştir; bu nedenle QMDP'ler yalnızca mevcut durumdaki belirsizliği dikkate alırlar. Sonrasında, gözlemlerdeki potansiyel belirsizliği görmezden gelerek sistemi tamamen gözlemlenebilir kabul ederler (Papakonstantinou ve Shinozuka, 2014). Ayrıca, en yakın gelecekteki kararlar daha uzak kararlara göre daha önemli değildir. Yani, zaman ufkunun darlığı karar vermede rol oynamaz.

MLS ve QMDP yöntemleri, kısmi gözlemlenebilirliği göz ardı ederek durumun gözlemlenebilir olmasına izin verir ve bunların politikaları, sistemin durumu hakkında daha fazla bilgi kazanarak eylemleri seçmez. Bu yaklaşımları iyileştirmek için gözlem olasılıklarını güncellemeye entegre eden Hızlı Bilgilendirilmiş Sınır yöntemi önerilmektedir. Hauskrecht ve Fraser (2000)'in bu sezgiseli gözlemin gürültüsünü (noise) güncelleme adımına dahil eder ve beklenen gözlemi kullanarak her durum için en iyi eylemi seçer.

- **Kılavuz Bazlı Yaklaşımlar**

Bu algoritma (Bonet, 2002; Brafman, 1997; Drake, 1962; Zhou ve Hansen, 2001), sürekli inanç uzayında bir değer fonksiyonunun interpolasyon-ekstrapolasyon yöntemi ile inanç uzayının rastgele bir noktasında tahmin edilebilmesine dayanır. Yani sürekli inanç uzayında değer fonksiyonu, sonlu kılavuz nokta setiyle de yaklaştırılabilir (Papakonstantinou ve Shinozuka, 2014). Buna benzer bir başka yöntem de eğri uydurma yaklaşımlarıdır (curve fitting approaches) (Hauskrecht ve Fraser, 2000).

- **Nokta Bazlı Yaklaşımlar**

Nokta temelli yöntemler, kesin (exact) yöntemlere göre çok daha büyük problemleri çözebilme yeteneklerinden ötürü son dönemde oldukça popülerlik kazanan çevrimdışı POMDP yaklaşım tekniklerindedir. Kesin yöntemler sayısı onlarla ifade edilebilecek durumlu modelleri çözmekte zorlanırken, modern nokta bazlı çözümler, binlerce durumluk problemleri çözmek için tasarlanabilir. Bu geçmişe göre büyük bir gelişme olarak görülmektedir. Böylece ciddi hesapsal zorluklarından dolayı büyük durum uzayları ile başetme sorunu ortadan kalkar. Bu yöntemlerin altında yatan asıl gelişme, inanç uzayının, seçici inanç noktalarının örneklenmesi ile (selective belief point sampling) yaklaşıklaştırılmasıdır. Böylece, değer fonksiyonunun üstel büyümesi önlenir. Bu nedenle, uzun zaman ufuklu büyük durum uzaylı POMDP'lerinin çözümü için çok daha az hesaplama gücü gerekir. Literatürde değişik karakterde, farklı nokta bazlı algoritmalar mevcuttur. Nokta bazlı algoritmalar arasındaki temel farklar; inanç uzayı alt kümesi seçimi, bu kümenin sabit ya da genişleyen olması durumu, değer fonksiyonu güncellemelerinin sırası, hangi noktaların güncellendiği ve yedeklerin nasıl sıralandığıdır. Nokta bazlı yöntemler ile açgözlü ve sezgisel temelli yöntemler arasında bir ilişki kurulabilir. Bunun nedeni nokta temelli yöntemlerin ebeveynleri olarak açgözlü ve sezgisel tabanlı yöntemlere sahip olmaları ve bazı yaklaşımlarını miras almalarıdır. Örneğin, DP güncellemesini yalnızca sonlu inanç düğümleri alt kümesi üzerinden çalıştırma fikrini kılavuz temelli yaklaşımdan miras alırlar. Ayrıca değer fonksiyonunun sezgisel olarak başlatılması veya α -vektör budaması gibi çeşitli optimizasyonlar bulunabilir. Kesin (exact) yöntemlerde, optimal değer fonksiyonu üretilen α -vektör setinden oluşturulur. Her α -vektör, tüm inanç uzayı boyunca güncellenir. Nokta temelli yaklaşımlar ise yalnızca seçilen sınırlı bir inanç noktası alt kümesini dikkate alarak güncelleme işlemini optimize eder. Nokta temelli bir çözümlerin bir iterasyonunda inanç güncelleme işlemi tek bir inanç noktası üzerinden Denklem (19) ile tanımlanır. Yedekleme işlemi, verilen inanç noktası b 'yi maksimize eden α -vektörünü aramayı hedefler. Bu nedenle,

burada bu inanç noktası b için Γ_t setinden en iyi α -vektörünü yedekler.

$$b' = \alpha_t^b = \operatorname{argmax}_{\alpha \in \Gamma_t} \left\{ \sum_{s \in S} b(s) \alpha(s) \right\} \quad (19)$$

Nokta Bazlı Değer İterasyonu (Point based Value Iteration - PBVI) (Pineau vd., 2003), başlangıçtaki inanç durumundan ulaşılabilen, yalnızca sınırlı bir inanç uzayı alt kümesi oluşturma fikrini esas alır. Nokta temelli yaklaşımların varsayımı şöyledir: Yüksek yaklaşma doğruluğuna sahip ulaşılabilir inanç bölgelerini kapsaması için inanç uzayının temsili bir sonlu alt kümesi seçilebilir. PBVI, her iterasyonda açgözlülükle mevcut inanç noktalarından mümkün olduğunca uzak olan yeni ulaşılabilir inanç noktalarını seçerek inanç alt kümelerini genişletir. Yeni noktalar, POMDP modelinden stokastik olarak örneklenir, bu nedenle ulaşılabilir olması garanti edilir. Her inanç noktası iterasyonunda, yeni halef noktaları en kötü durum yoğunluğunu artıracak şekilde seçilmiştir. Bu nedenle, toplanan sınırın içinde ulaşılabilir inanç noktaları ile kapsanan inanç uzayı kesin (exact) olacaktır. Elde edilen politikanın performans hızını ve kalitesini etkileyen diğer parametreler arasında en önemlisi, seçilen inanç alt kümesinin boyutu ve yedekleme aşamasındaki yinelemelerin sayısıdır. Diğer parametreler gibi, hesaplama maliyeti ile sonucun doğruluğu arasında bir denge (trade-off) sağlarlar. Örneğin, sonucun kalitesi doğrudan sürece katılan inanç noktalarının sayısına bağlıdır. Bununla birlikte, seçilen inanç noktalarının sayısındaki artış, değer güncelleme aşamasının performansını yavaşlatmaktadır. Aynı etki yedek sayısından da gelir.

Perseus: POMDP'ler için Rassal Nokta Bazlı Değer İterasyon Algoritması (Randomized Point based Value Iteration for POMDPs) (Spaan ve Vlassis, 2005), nokta-temelli değer iterasyonunun rassallaştırılmış versiyonudur. Perseus, her iterasyon için gereken inanç güncellemesi sayısını azaltarak, değer fonksiyonu yaklaştırmasında bir kayıp olmadan değer iterasyonu sürecinde hesaplama verimini artırır. Nokta temelli algoritmalar genellikle inanç nokta toplama ve yedekleme adımları arasında yineleme yaparken, Perseus başlangıçta sabit bir ulaşılabilir inanç noktaları kümesi, B , oluşturur. Bu inanç noktaları kümesi, diğer nokta-bazlı algoritmaların sezgisel yaklaşımları ile karşılaştırıldığında daha az karmaşık bir yöntemle kurulur, bu sebeple genellikle daha fazla nokta içerir. İnanç nokta kümesi genişletildiğinden, Perseus sadece her iterasyonda gerekli en az inanç nokta yedeklemesi yapar. Çünkü B kümesindeki tüm noktalar için değer fonksiyon yaklaşımlarının iyileştirilmesini garanti edinceye kadar B 'nin sadece bir alt kümesi üzerinde çalışır. İlk olarak "iyileştirilmemiş (unimproved)" inanç noktaları kümesi, B' , üzerinde işlem yapılır. Yedekleme iterasyonundaki her adımda, rastgele örneklenen inanç noktası b 'yi yedekler ve "iyileşmiş"

olarak sayar. Daha sonra yeni α -vektör ile daha iyi bir değer sağlayan tüm inanç noktalarını B' kümesinden çıkarır. Bu iterasyon işlemi, B' boşalana kadar yani başlangıçtaki inanç setindeki tüm noktalar için değer fonksiyonu yaklaşmasının iyileştirildiğini garanti edene kadar tekrarlanır (Papakonstantinou ve Shinozuka, 2014a). B' boşaltıldıktan sonra, tüm iterasyon süreci, durma kriteri (stopping condition) sağlanana kadar yeniden devam eder. Tek bir yedekleme iterasyonu, B kümesindeki birçok inanç noktasının değerini iyileştirdiği için, her iterasyonda (özellikle erken aşamalarda) daha az nokta-temelli yedekleme gerekir, böylece daha fazla inanç noktası güncellemesi iterasyonu yapılabilir. Genel olarak, bu yöntem elde edilen değer fonksiyonunun kalitesini artırır.

Symbolic Perseus, bileşenleri temsil etmek için veri yapısı olarak ADD'leri kullanan nokta tabanlı bir değer yineleme algoritmasıdır. Symbolic Perseus, ilk olarak Pascal Poupart'ın doktora tez çalışması olarak sunulmuş (Poupart, 2005), daha sonra bir çok çalışmada kullanılmıştır (Boger vd., 2005; Hoey vd., 2010; Hoey vd., 2007). Symbolic Perseus'un diğer algoritmalara göre önemli bir farkı, değer fonksiyonunu temsil eden vektör sayısına, politika kalitesinde bir kayıp olmadan, bir sınırlama getirmesidir. Böylece, yedekleme işlemlerinin hesaplama maliyeti azalır. Ayrıca, boyutluluk sorununu çözmek için (curse of dimensionality), durumları Bellman hatasından daha az farklılık gösteren değerlerle birleştirerek bir inanç durumu yaklaşması kullanır. Bu, inanç durumunun, bileşelerin bağımsız marjinal olasılıklarının bir çarpımı olarak kompakt faktörlü bir gösterimi ile başarılmıştır. Symbolic Perseus, temel ADD işlemlerini daha verimli bir şekilde uygular, bu nedenle inanç durumu yedeklemeleri ve güncellemeleri daha hızlı çalışır. Bir başka deyişle, inanç durumları ve α -vektörleri için kullanılan ADD'ler gereken bellek ve hesaplamalarda ciddi tasarruflar sağlar. Geçmiş sorununu ise değer fonksiyonu için vektörlerin sayısını sınırlayarak çözer. Symbolic Perseus'un ölçeklenebilirliği, faktörlü POMDP'ler üzerinde 50 milyon durumla başarılı bir şekilde test edilmiştir.

4 BULGULAR

Reaktif bakım stratejisi altında önerilen bütün yöntemlerin, Luvo sistemi üzerinde hem toplam bakım sayısına hem de toplam bakım maliyetine dayalı simülasyonları gerçekleştirilmiştir. Her yöntem, belirli bir planlama ufkundaki toplam bakım sayısı ve toplam bakım maliyetine göre, Matlab ortamında BNT araç kutusu (Murphy, 2001) kullanılarak çalıştırılmış ve analiz edilmiştir. Planlama ufku, yıllık olarak yapılan ve iki ay süren revizyon zamanları çıkarılarak, 300 gün olarak belirlenmiştir. Karşılaştırmalar için % 95 güven aralığıyla, ANOVA ve ANOVA sonrası testler uygulanmıştır. Sonuçlar Bölüm 4.1 ve 4.2'de verilmiştir.

DBN bazlı önerilen üç adet proaktif bakım stratejisiyle reaktif bakım stratejisi, bakım maliyetleri cinsinden Luvo sistemi üzerinde çeşitli senaryolar tasarlanarak karşılaştırılmıştır. Proaktif bakım stratejilerinde bakım eylemini seçmek için, bakım maliyetlerine dayalı reaktif bakım sonuçlarında en iyi olan bakım yöntemi kullanılmıştır. Karşılaştırma sonuçları Bölüm 4.3'te verilmiştir.

Tüm hesaplamalar 64 bit Windows, Intel (R) Xeon CPU, 2.40 GHz, ve 12 GB RAM'i olan masaüstü bir PC ve eşdeğerlerinde gerçekleştirilmiştir. Ortalama simülasyon süresi FEM ve FEL yöntemleri için yaklaşık olarak 20 dakika, REM ve REL yöntemleri içinse 1,5 saattir. Aradaki farkın sebebi FEM ve FEL yöntemleri uygulanırken her bakım zamanında sadece bir kez çıkarım (inference) hesaplaması yapılırken, REM ve REL yöntemlerinde bakım kararı alındığında her bileşen için ayrı çıkarım hesaplamaları yapılmasıdır. RND yönteminde ise bakım yapılacak bileşenler rastgele seçildiğinden ötürü hiçbir ekstra çıkarım yapılmadığı için, bu yöntemin simülasyonu yaklaşık olarak 10 dakika sürmektedir. Bu süreler, her bir zaman diliminde gözlem örnekleme ve düzeltici bir bakım kararı alındığında bileşenlerin seçimi için yapılan çıkarım hesaplamaları göz önüne alındığında 300 günlük bir zamanlama ufku için kabul edilebilirdir.

Üçüncü iş paketi kapsamında, mevcut bakım problemleri için hangi POMDP çözücüsünün uygun olduğuna karar vermek amacı ile platformlarda bulunan mevcut POMDP çözücüleri araştırılmış ve Bölüm 2'de raporlanmıştır. Seçilen çözücülerin performansını değerlendirebilmek için, artan karmaşıklık düzeylerinde dört bakım problemi tasarlanmıştır. POMDP çözücüleri, toplam bakım maliyeti ve çözüm süreleri karşılaştırılarak değerlendirilmiştir. Sonuçlar, Bölüm 4.4'te verilmiştir.

Uygun çözücü belirlendikten sonra, çok-bileşenli sistemlerin bakım problemlerinin doğal faktörlü yapısından yararlanarak çeşitli analizler yapmak üzere, zaman içinde bozulan kısmen gözlemlenebilir bileşenlerden oluşan deneysel bir bakım problemi tasarlanmıştır. Model, faktörlü

POMDP olarak modellenmiş ve faktörlü POMDP'leri çözmek için geliştirilen Symbolic Perseus-MATLAB (SPM) çözücüsünde çözdürülerek politika elde edilmiştir. Elde edilen politikanın, 100 günlük zaman ufkunda simülasyonu yapılmış ve beklenen bakım eylem sayıları ve maliyeti elde edilmiştir. POMDP politikası çeşitli duyarlılık ve senaryo analizleri yapılarak derinlemesine araştırılmıştır. Ayrıca, bu politikaların davranışları incelenerek, onları taklit eden çeşitli akıllı, önceden belirlenmiş politikalar tasarlanmış ve bunların sonuçları değişik senaryolarda POMDP politikalarıyla karşılaştırılmıştır. Duyarlılık analizleri, güçlü bulgular elde etmek için çeşitli maliyetler ve olasılık parametreleri ile çeşitli senaryolar altında gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar, Bölüm 4.5'te verilmiştir.

Bölüm 3.3'de detayları verilen paralel iki motor gruplu (iki-hatlı) Luvo sistemi faktörlü POMDP olarak modellenmiş ve SPM çözücüsü ile çözdürülmüştür. Ancak, proje önerisinde de planlandığı üzere, problemin büyüklüğünden dolayı kabul edilebilir bir zamanda anlamlı bir politika elde edilememiştir. O yüzden POMDP'lerle modelleyip çözdürmek amacıyla Luvo sistemi tek motor grubundan oluşacak şekilde Bölüm 4.6'da tek-hat Luvo olarak modifiye edilmiştir. Tek-hat Luvo sistemi için faktörlü yapıda POMDP modeli kurulmuş ve değişik senaryolarda SPM ile elde edilen politikalar 900 günlük zaman ufkunda simüle edilmiştir. POMDP politikası, farklı birim duruş maliyetleri altında analiz edilmiştir. Ayrıca, faktörlü POMDP politikasının performansı, önceden tanımlanmış iki reaktif politika ile karşılaştırılmıştır. Sistemin olasılıklar ve bakım maliyetleri açısından kritik bileşenleri çeşitli analizlerle belirlenmiş, harici değişkenlerin etkileri farklı senaryolarla tartışılmıştır. Ayrıca, gözlem uzayı sınırlandırılarak ve genişletilerek ve eylem uzayına bir denetim düğümü eklenilerek analiz edilmiştir.

Son olarak, modifiye edilmiş tek-hat Luvo sistemi DBN bazlı reaktif ve proaktif bakım stratejileri ile de çözdürülmüş ve sonuçları faktörlü POMDP çözücüsünden elde edilen bakım politikaları ile farklı birim duruş maliyetleri altında Bölüm 4.7'de karşılaştırılmıştır. DBN bazlı stratejiler sezgisel olup bakım problemini ayrıştırıp iki seviyede ele almaktadırlar. Ayrıca bakım eylemini seçmek için önerilen bakım yöntemleri de sezgiseldir. Dolayısıyla modifiye Tek-hat Luvo sistemi üzerinde faktörlü POMDP ile elde edilen politikalar planlama ufkunda daha düşük toplam maliyet vermişlerdir. Ancak şunu da unutmamak gerekir ki, problemin boyutu daha da büyüdüğünde, örneğin orjinal Luvo sisteminin bakım probleminde, POMDP'ler politika oluşturmakta zorlanabilmektedirler. Diğer taraftan DBN'ler de büyük boyutlu problemlerde çıkarım hesaplamalarında zorlanabilirler, ama çalışmanın sonuçları göstermiştir ki DBN bazlı önerilen stratejiler ve metodlar orjinal Luvo sisteminin bakım probleminde iyi sonuçlar bulabilmişlerdir.

Bu bölümdeki tüm istatistiksel karşılaştırmalar için ANOVA modeli kullanılmıştır. Modellerin

normal dağılım ve eşit varyans varsayımları kontrol edilmiştir. Varsayımların sağlandığı durumlarda ikili karşılaştırmalar Tukey testi (Ghosh ve Sharma, 1963) ile yapılmıştır. Artıkların normal dağılıma uyduğu fakat varyansların eşit olmadığı durumlarda analizler farklı varyanslara sahip olan örneklemeler olduğunda kullanılabilen Games-Howell (GH) testi ile yapılmıştır (Games ve Howell, 1976). Testlerin sonuçlarında raporlanan aynı harf, aralarında istatistiksel fark olmayan grupları göstermektedir.

4.1 Bakım Sayısı Odaklı Luvo Reaktif Bakım Modellemesi Bulguları

Bölüm 3.4.1'de akışı verilen reaktif bakım stratejisi altında Bölüm 3.4.2'de önerilen bakım sayısı bazlı bütün yöntemler, Luvo sisteminin 300 günlük bir planlama ufunda gerçekleşen toplam bakım sayısını en azlamak için Bölüm 3.3'te ayrıntıları verilen Luvo DBN modelini kullanarak 50 replikasyon çalıştırılmıştır. Ayrıca, önerilen yöntemlerle kıyaslamak amacıyla, hiçbir verimlilik ölçütü kullanmayan, bakım yapılacak bileşenleri rastgele seçen Rastgele Bakım Metodu (RND) da kullanılmıştır. ANOVA'nın normallik ve sabit varyans varsayımları için model yeterliliği kontrol edilmiş ve herhangi bir ihlalle karşılaşmamıştır. İkili istatistiksel karşılaştırmalar için Tukey testi (Ghosh ve Sharma, 1963) kullanılmıştır.

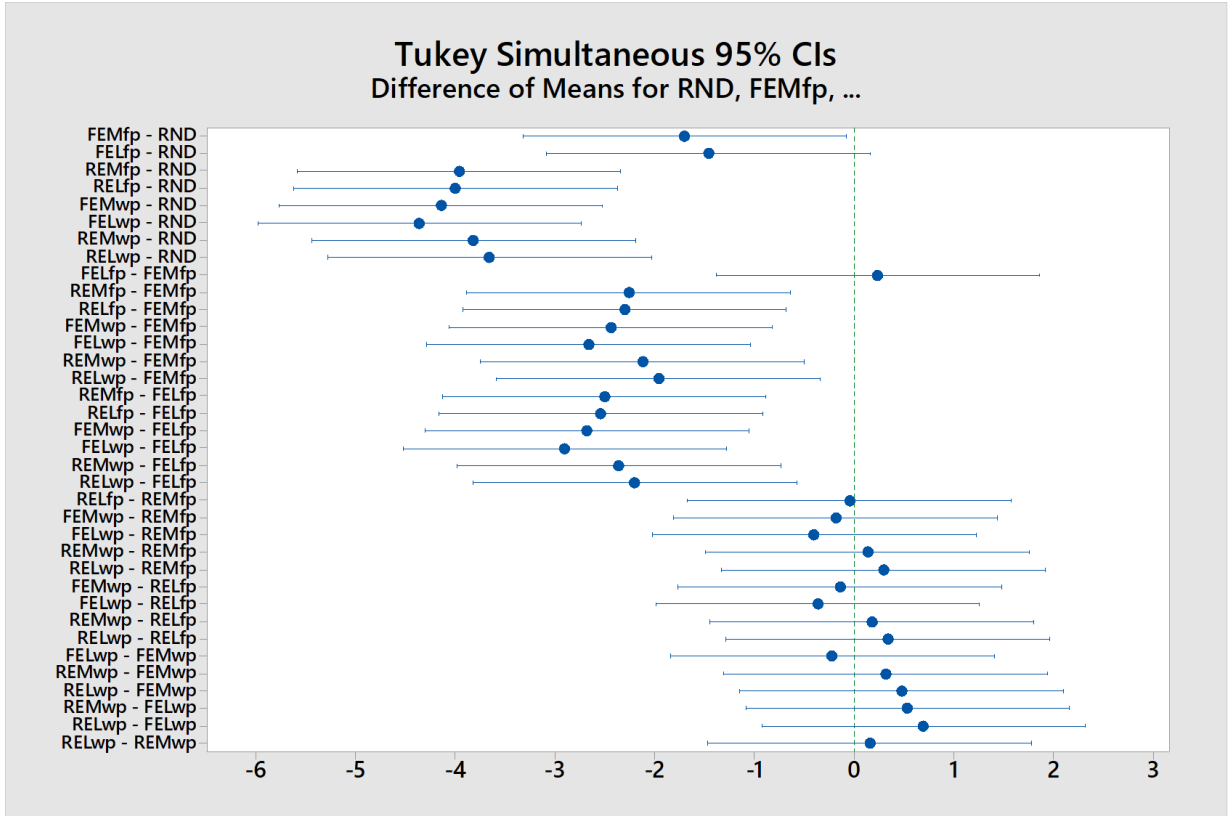
4.1.1 Bakım Yöntemlerinin Karşılaştırma Sonuçları

Önerilen yöntemler üzerinde planlama ufunda gerçekleştirilen toplam bakım sayısı dikkate alınarak tek faktörlü ANOVA analizi yapılmış, bu analiz sonucunda p-değeri 0,000 bulunmuştur. Bu da istatistiksel olarak yöntemlerden en az birinin performansının diğerlerinden anlamlı ölçüde farklı olduğunu göstermektedir. Hangi yöntemlerin farklı olduğunu bulabilmek için, ANOVA sonrası analizler yapılmıştır. Tablo 11 and Şekil 18, 0,05 anlamlılık düzeyinde Tukey ikili karşılaştırma testi kullanılarak elde edilen sonuçları göstermektedir. Bu ve sonraki tablolarda verilen Ss standart sapmayı, GA %95 güven aralığını, Tk Tukey gruplarını, GH ise Games-Howell gruplarını göstermektedir. Tablo 11'deki Tukey grupları, yöntemlerin performansları arasındaki farklılıkları ve benzerlikleri göstermektedir. Bir harfi paylaşmayan yöntemlerin ele alınan anlamlılık seviyesinde birbirlerinden farklı olduğunu söyleyebiliriz. Şekil 18'de %95 güven aralığıyla ikili karşılaştırmalar verilmiştir. Sıfırı içeren aralıklar, ilgili yöntemlerin birbirinden önemli ölçüde farklı olmadığını göstermektedir.

ANOVA sonuçlarına göre performans olarak en kötü yöntem beklenildiği gibi Rastgele Yöntem

Tablo 11. Reaktif bakım altında bakım sayısına göre yöntemlerin sonuçları

Yöntem	Bakım Sayısı	Ss	%95 GA	Tk
RND	19,140	3,117	(18,254; 20,026)	A
FEL _{fp}	17,680	2,846	(16,871; 18,489)	A,B
FEM _{fp}	17,440	3,072	(16,567; 18,313)	B
REL _{wp}	15,480	2,581	(14,746; 16,214)	C
REM _{wp}	15,320	2,403	(14,637; 16,003)	C
REM _{fp}	15,180	2,537	(14,459; 15,901)	C
REL _{fp}	15,140	2,657	(14,385; 15,895)	C
FEM _{wp}	15,000	2,060	(14,414; 15,586)	C
FEL _{wp}	14,780	2,043	(14,199; 15,361)	C



Şekil 18. Bakım sayısına göre yöntemlerin ortalama farkları için güven aralıkları

(RND) olmuştur. FEL_{fp} hariç diğer tüm yöntemlerin performansları istatistiksel olarak RND'den daha iyi çıkmıştır. FEL_{fp} ile RND'nin ikili güven aralıkları az farkla da olsa sıfırı içerdiği için bu iki

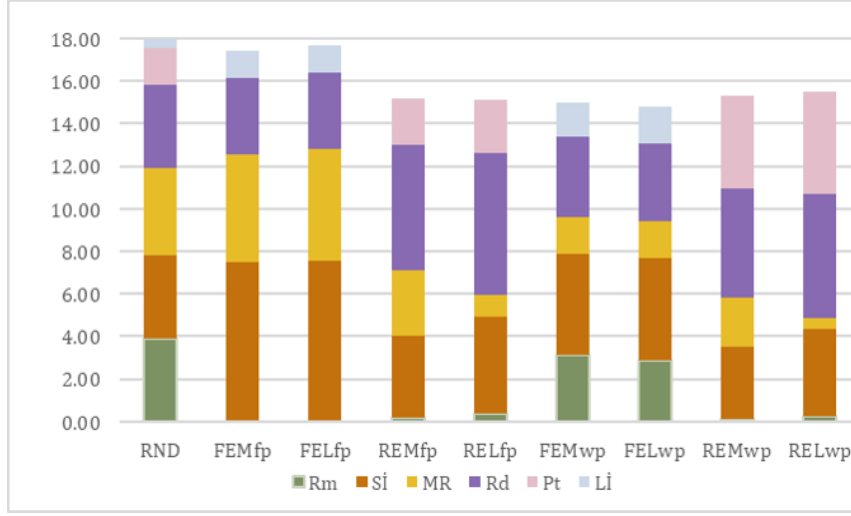
yöntemin birbirinden farklı olduğu istatistiksel olarak söylenemez. İstatistiksel analiz, farklı sonraki olasılık (posterior probability) ölçütlerinin hem FEM hem de FEL yöntemleri için istatistiksel olarak farklı sonuçlar verdiğini göstermektedir. En iyi sonuçları veren yöntemler, arıza etkili, bileşenlerin sonraki en iyi çalışma durumu olasılıklarını dikkate alan FEM_{wp} ve FEL_{wp} yöntemleridir. REM ve REL yöntemlerinde, farklı sonraki olasılık ölçütleri istatistiksel olarak benzer sonuçlar vermektedir. Fakat, daha önceden açıklandığı gibi REM ve REL yöntemleri gözlem düğümünün durumunun iyileştirilmesini göz önüne aldığından ve reaktif bakım, gözlem düğümü sistemde bir arıza olduğunu gösterdiğinde uygulandığından, REM yöntemleri kullanılacaksa, REM_{fp} ve REL_{fp}'nin kullanımı daha mantıklıdır. Sonuç olarak, planlama ufkundaki toplam bakım sayısı ve simülasyon süresinin daha kısa olması göz önüne alındığından FEM_{wp} ve FEL_{wp} yöntemleri en iyi yöntemler olarak ifade edilebilir.

4.1.2 Bileşenlerin Bakım Tedarik Planlaması

Gözlem düğümü bir arızayı gösterdiğinde, bakım mümkün olan en kısa sürede yapılmalıdır. Bunun yapılabilmesi için bazı kaynakların (yedek parçalar, personel, test ekipmanları vb.) reaktif bakım zamanında acilen sağlanması gerekir. Bu noktada yedek parçaların tedarik planlaması büyük önem taşımaktadır. Bu nedenle simülasyon sonuçlarına göre her bir bileşen için ortalama yıllık tedarik gereksinimleri çıkarılmıştır. Sonuçların verildiği Tablo 12'de Rm, Sİ, MR, Rd, Pt ve Lİ sırasıyla rulman, sargi-izolasyonu, mil-rotor, redüktör, petekler ve Luvo izolasyonunu temsil etmektedir. Ayrıca Şekil 19'da yöntemlere göre bileşenlerin dağılımları gösterilmiştir. Bu grafikte, iki motor grubundaki aynı bileşenlerin gereksinimleri toplanarak gösterilmiştir.

Tablo 12. Reaktif bakım altında bileşenlerin bakım gereksinimleri

Yöntem	Rm1	Sİ1	MR1	Rd1	Rm2	Sİ2	MR2	Rd2	Pt	Lİ	Bakım Sayısı
RND	1,76	2,12	2,18	1,86	2,16	1,76	1,96	2,00	1,74	1,60	19,14
FEM _{fp}	0,00	3,78	2,74	1,78	0,00	3,70	2,34	1,82	0,00	1,28	17,44
FEL _{fp}	0,00	3,90	3,00	1,86	0,00	3,64	2,26	1,74	0,00	1,28	17,68
REM _{fp}	0,14	1,98	1,58	3,00	0,04	1,90	1,46	2,90	2,18	0,00	15,18
REL _{fp}	0,14	2,18	0,46	3,28	0,26	2,34	0,58	3,40	2,50	0,00	15,14
FEM _{wp}	1,54	2,40	0,80	1,88	1,58	2,36	0,90	1,92	0,00	1,62	15,00
FEL _{wp}	1,42	2,38	0,88	1,82	1,46	2,42	0,86	1,82	0,00	1,72	14,78
REM _{wp}	0,02	1,60	1,02	2,60	0,08	1,82	1,30	2,50	4,38	0,00	15,32
REL _{wp}	0,10	1,96	0,26	2,94	0,14	2,14	0,28	2,88	4,78	0,00	15,48



Şekil 19. Reaktif bakım altında bileşenlerin bakım gereksinimlerinin dağılımı

Sonuçlara göre, RND yöntemi kullanıldığı zaman, reaktif bir bakım zamanında bileşenler rastgele seçildiğinden dolayı, beklenildiği gibi gereksinimleri homojen olarak dağılmıştır. FEM ve FEL yöntemlerinde “fp” ve “wp” ölçütleri farklı bileşen dağılımlarına sahiptirler. FEM_{fp} ve FEL_{fp} yöntemlerinde rulmanlara hiç bakım yapılmazken, FEM_{wp} ve FEL_{wp} yöntemlerinde bu bileşene bakım yapılmaktadır. Bu sonuç, iki farklı verimlilik ölçütü önerilmesini de haklı çıkarmaktadır. Rulman “Normal, İyi Yataklama Yapmıyor, Kilitlenmiş” olmak üzere 3 duruma sahiptir ve aslında “İyi Yataklama Yapmıyor” durumunda da rulmanlar etkili bir şekilde çalışmazlar. FEM ve FEL yöntemlerinde “fp” ölçütününün kullanılması, olasılıkları hesaplarken rulmanın “İyi Yataklama Yapmıyor” durumunu göz ardı eder ve böylece bileşen seçiminde rulman bakımı dikkate alınmaz. “wp” verimlilik ölçütü kullanıldığında ise, bileşenlerin en iyi çalışma olasılıklarına göre hesaplama yapılır ve rulmanın “İyi Yataklama Yapmıyor” durumu da göz önünde bulundurulmuş olur.

FEM ve FEL yöntemlerinde, petekler planlama ufku boyunca hiçbir zaman bakıma tabi tutulmamıştır. Bunun nedeni, petekleri temiz tutmak için termik santralde düzenli olarak bir kurum üfleme sisteminin kullanılması, bunun sonucunda da peteklerin yaşlanmalarının yavaşlayıp, bozulma olasılıklarının azalmasıdır. Öte yandan, bileşenleri gözlem düğümünün durumu üzerindeki iyileştirme etkilerine göre seçen REM ve REL yöntemlerinde peteklere bakım yapıldığı görülmektedir. Ayrıca bu yöntemlerde Luvo izolasyonunun hiçbir zaman değiştirilmediğine dikkat edilmelidir. İlk etapta bunun nedeninin, Luvo izolasyonunun Luvo çıkış sıcaklığı üzerindeki etkisinin çok az olmasından dolayı olduğu düşünülse de, aslında REM ve REL yöntemlerinde açıkça dikkate

alınan Luvo izolasyonu ile petekler arasındaki yapısal bağımlılığın bir sonucudur. Peteklerin temizliği sırasında Luvo izolasyonunun da değiştirilmesi gerektiğinden, Luvo izolasyonunun ayrıca değiştirilmesine gerek duyulmamaktadır. Dikkate alınması gereken bir diğer sonuç da, REM ve REL yöntemlerinde rulman değişiminin ya hiç yapılmaması ya da çok az yapılmasıdır. Bu yöntemler, bileşenlerin ölçülen Luvo sıcaklığı üzerindeki etkisini değerlendirdiğinden ve rulman ile ölçülen Luvo sıcaklığı arasında başka birçok bileşen olduğundan, rulmanın etkisi diğer bileşenlere göre azalmaktadır.

4.2 Bakım Maliyeti Odaklı Luvo Reaktif Bakım Modellemesi Bulguları

Bölüm 3.4.1'de akışı verilen reaktif bakım stratejisi altında Bölüm 3.4.2'de önerilen maliyet bazlı bütün yöntemler, Luvo sisteminin 300 günlük bir planlama ufkunda gerçekleşen toplam bakım maliyetini en azlamak için Bölüm 3.3'te ayrıntıları verilen Luvo DBN modelini kullanarak 30 replikasyon çalıştırılmıştır. Düzeltici bakım gerektiğinde bileşen kararının rastgele seçildiği rastgele seçim yöntemi (RND) de, önerilen yöntemlerin performanslarını analiz etmek için kullanılmıştır. Bölüm 3.4.3'te önerilen normalleştirme prosedürünün etkisini ve önemini vurgulamak için, tüm yöntemler ilk önce normalleştirme prosedürüne tabi tutulmadan simüle edilmiştir. Sonuçlar, her bir bileşenin ortalama bakım miktarını, ortalama toplam bakım sayısının ve ortalama toplam bakım maliyetinin birlikte rapor edildiği Tablo 13'te verilmektedir.

Tablo 13. Normalleştirme prosedürü uygulanmadan replikasyon sonuçları

Yöntem	Rm1	Sİ1	MR1	Rd1	Rm2	Sİ2	MR2	Rd2	Pt	Lİ	Bakım Sayısı	Bakım Maliyeti
RND	1,67	2,40	1,97	1,93	2,27	1,60	1,83	2,03	1,77	1,80	19,27	1.467.477
FEM _{fp}	1,80	1,10	0,50	2,80	1,70	1,00	0,50	2,70	0,00	2,10	14,20	828.710
FEL _{fp}	1,80	1,00	0,60	2,90	1,80	1,10	0,40	2,70	0,00	2,30	14,60	846.630
REM _{fp}	22,00	0,00	0,00	0,60	21,50	0,00	0,00	0,70	0,00	0,20	45,00	1.252.120
REL _{fp}	21,80	0,00	0,00	0,60	21,20	0,00	0,00	0,40	0,00	0,10	44,10	1.218.010
FEM _{wp}	20,50	0,00	0,00	0,60	21,40	0,00	0,00	0,90	0,00	0,10	43,50	1.214.310
FEL _{wp}	20,70	0,00	0,00	0,80	20,40	0,00	0,00	0,70	0,00	0,20	42,80	1.197.720
REM _{wp}	21,80	0,00	0,00	0,60	19,70	0,00	0,00	0,30	0,00	1,00	43,40	1.217.400
REL _{wp}	20,80	0,00	0,00	0,30	19,80	0,00	0,00	0,30	0,00	1,00	42,20	1.177.500

Replikasyon sonuçları, FEM_{fp} ve FEL_{fp} dışındaki tüm yöntemlerde neredeyse her reaktif bakım zamanında rulmanın seçildiğini göstermektedir. Bunun nedeni rulmanın maliyetinin diğer bileşenlere göre daha az olmasıdır. En düşük bakım maliyetine sahip bileşenin seçilmesi, bakımın

yapıldığı o zaman aralığı için bir avantaj olarak görülse de, özellikle söz konusu bileşenin tüm sistemin güvenilirliğine katkısı fazla olmadığında, uzun vadede daha fazla mali kayba neden olur. Bu nedenle bakım kararları verilirken maliyet ve olasılık etkilerinin dengelenmesi gerekmektedir.

FEM_{fp} ve FEL_{fp} verimlilik ölçütleri, bileşenlerin sonraki en kötü durum olasılıklarından büyük ölçüde etkilenirken, maliyet değerlerinden daha az etkilenir. Bunun nedeni bileşenlerin sonraki en kötü durum olasılıklarının birbirlerinden çok farklı olduğun bileşenlerin sonraki en kötü durum olasılıklarının maks-min oranı bileşenlerin bakım maliyetlerinin maks-min oranına kıyasla daha büyük olmasıdır. Bu nedenle bu yöntemler, daha az maliyete sahip olmasına rağmen her reaktif bakım zamanında rulmanı seçme eğiliminde değillerdir. Buna karşılık, FEM_{wp} ve FEL_{wp} verimlilik ölçütlerinde sonraki en iyi durum olasılıkları kullanıldığından, bu olasılık değerleri sonraki en kötü durum olasılıklarına göre daha büyüktür ve bundan dolayı olasılıkların maks-min oranı maliyetlerinkine göre daha küçüktür. Bu nedenle, bu seçim yöntemlerinde maliyet baskındır ve bu, rulmanın neredeyse bütün bakım zamanlarında dikkate alınmasına sebep olur.

Değiştirme etkili yöntemlerde, tüm verimlilik ölçütleri, her bir bileşenin belirli bir zaman diliminde değiştirildiği varsayımı altında, gözlem düğümünün sonraki olasılıklarına dayanmaktadır. Bu nedenle gözlem düğümünün sonraki olasılıkları birbirlerinden çok farklı değillerdir ve bileşenlerin bakım maliyetlerinin maks-min oranına kıyasla küçük bir maks-min oranına sahiplerdir. Sonuçta bu yöntemler maliyet faktöründen büyük ölçüde etkilenir ve neredeyse tüm bakım zamanlarında rulmanın seçimine neden olur. Bu sonuçlar normalleştirme prosedürünün gerekliliğini haklı çıkarmaktadır.

4.2.1 Normalleştirme Prosedürüyle Replikasyon Sonuçları

Normalleştirme prosedürü uygulanmadan önce, FEM_{fp} ve FEL_{fp} yöntemlerinde olasılık faktörü maliyet faktörüne göre daha etkilidir; diğer yöntemlerde ise tam tersi bir durum söz konusudur. Normalleştirme prosedürü, tüm verimlilik ölçütlerinde bileşenlerin sonraki olasılıklarının etkisini maliyet faktörünün etkisiyle aynı seviyesine getirmeyi amaçlar. Normalleştirme prosedürü uygulanmış her yöntem, 300 günlük planlama ufkuunda 50 replikasyon çalıştırılmış ve sonuçlar Tablo 14'te gösterilmiştir. Bu prosedürden sonra, reaktif bakım zamanlarında bileşen seçimleri yapılırken dağılımın daha dengeli olduğu ve yöntemlerin rulmandan başka bileşenleri de bakım için seçtiği görülmektedir. Sonuçlara göre, maliyetler düşünüldüğünde normalleştirme prosedürünün tüm yöntemlerin performanslarının iyileştirilmesine yardımcı olduğu açıkça görülmektedir.

Tablo 14. Önerilen yöntemlerin normalleştirme prosedüründen sonraki replikasyon sonuçları

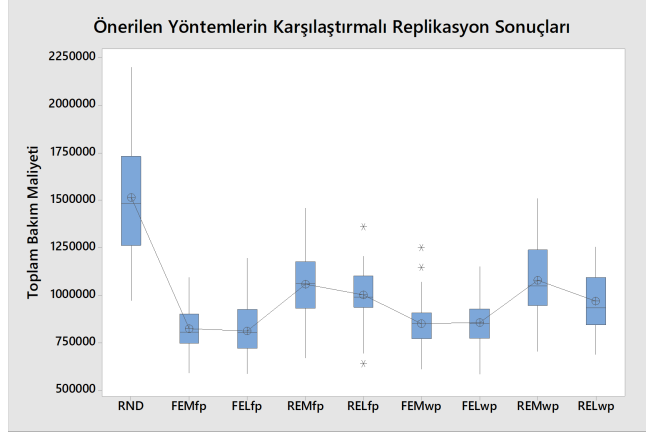
Yöntem	Rm1	Si1	MR1	Rd1	Rm2	Si2	MR2	Rd2	Pt	Li	Bakım Sayısı	Bakım Maliyeti
RND	1,760	2,120	2,180	1,860	2,160	1,760	1,960	2,000	1,740	1,600	19,140	1.516.914
FEM _{fp}	5,780	0,720	0,280	2,820	5,080	0,480	0,100	2,420	0,000	1,620	19,300	823.432
FEL _{fp}	5,760	0,620	0,060	2,680	5,320	0,540	0,160	2,660	0,000	1,580	19,380	811.728
REM _{fp}	0,180	1,560	0,900	3,720	0,200	1,400	0,880	3,660	0,000	2,880	15,380	1.059.378
REL _{fp}	0,440	1,560	0,400	3,700	0,420	1,640	0,380	3,780	0,000	2,840	15,160	1.001.634
FEM _{wp}	2,520	1,060	0,640	2,320	2,480	1,060	0,640	2,320	0,000	1,980	15,020	849.198
FEL _{wp}	2,560	1,000	0,600	2,100	2,620	1,220	0,720	2,360	0,000	1,920	15,100	857.252
REM _{wp}	0,320	1,260	0,900	3,380	0,160	1,260	0,700	3,120	0,000	5,480	16,580	1.077.708
REL _{wp}	0,440	1,280	0,320	3,240	0,360	1,260	0,300	3,120	0,000	5,220	15,540	968.872

Replikasyon sonuçlarına göre tüm yöntemlerin toplam bakım maliyetlerini gösteren kutu grafiği Şekil 20'de verilmiştir. Şekilde RND yönteminin en maliyetli yöntem olduğu açıkça görülmektedir. Önerilen yöntemler üzerinde ANOVA analizi yapıldığında p-değeri 0,000 çıkmıştır. Bu da önerilen yöntemlerden en az birinin diğerlerine göre istatistiksel olarak önemli ölçüde farklı olduğunu göstermektedir. ANOVA sonrası analizler yapılmadan önce, modelin uygunluğunu ölçmek için artıklar kontrol edilmiştir. Artıklar neredeyse normal olarak dağılmış olmalarına rağmen, sabit varyans varsayımını ihlal edebilecekleri anlaşılmıştır. Bunun üzerine yöntemlerin artıklarının eşit dağılıp dağılmadığını anlamak için Bartlett's testi uygulanmış ve p-değeri 0,003 olarak bulunmuştur. Bu değer ANOVA testi için gerekli olan sabit varyans varsayımının 0,05 anlamlılık seviyesinde gerçekleşmediğini göstermektedir. Analizlere, farklı varyanslara sahip olan örneklem olduğunda kullanılabilen Welch testi ve Games-Howell testleriyle devam edilmiştir. Tablo 15 ve Şekil 21, Games-Howell (GH) test sonuçlarını göstermektedir.

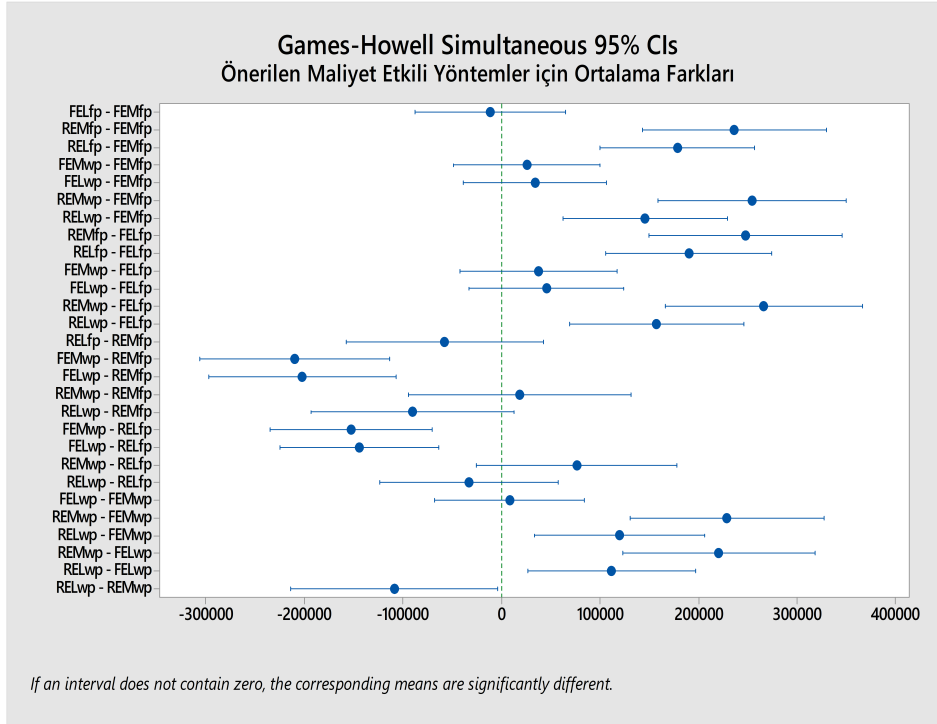
Tablo 15. DM=25.000 TL iken normalleştirilmiş yöntemlerin karşılaştırma sonuçları

Yöntem	Bakım Maliyeti	Ss	%95 GA	GH
REM _{wp}	1.077.708	185.427	(1.025.010, 1.130.406)	A
REM _{fp}	1.059.378	179.497	(1.008.365, 1.110.391)	A,B
REL _{fp}	1.001.634	139.627	(961.952, 1.041.316)	A,B
REL _{wp}	968.872	152.335	(925.579, 1.012.165)	B
FEL _{wp}	857.252	120.054	(823.133, 891.371)	C
FEM _{wp}	849.198	125.957	(813.402, 884.994)	C
FEM _{fp}	823.432	113.416	(791.200, 855.664)	C
FEL _{fp}	811.728	132.478	(774.078, 849.378)	C

Bu testte iki yöntemin aynı harfe sahip olması ortalamalarının istatistiksel olarak farklı



Şekil 20. Önerilen yöntemlerin karşılaştırmalı kutu grafiği



Şekil 21. Bakım maliyetine göre önerilen yöntemlerin ortalama farkları için güven aralıkları

olmadığını göstermektedir. Sonuçlara göre tüm arıza etkili yöntemler en iyi yöntemlerdir ve birbirlerinden önemli ölçüde farklı değillerdir. Değişirme etkili yöntemler arasında REM_{wp} , REL_{wp} 'den önemli ölçüde daha yüksek maliyet değeri vermektedir. FEM ve FEL yöntemlerinin en az ortalama bakım maliyeti verdiği sonucuna ek olarak, bu yöntemler simülasyon süresi açısından

da REM ve REL yöntemlerinden daha üstündür.

4.2.2 Yöntemlerin Saatlik Duruş Maliyetine Göre Duyarlılık Analizi

Toplam duruş maliyeti, toplam bakım maliyetinin bir parçasıdır ve bir bileşenin bakım süresiyle saatlik duruş maliyetinin çarpılmasıyla elde edilir. Saatlik duruş maliyeti, hava-gaz hatlarından birindeki arıza nedeniyle termik santralin saatlik kar kaybına dayanmaktadır ve bu kayıp, kömür gideri ve elektrik fiyatı gibi dahili olarak kontrol edilemeyen bazı faktörlere göre değişebilir. RAH sistemi için dört farklı saatlik duruş maliyeti dikkate alınmıştır: 12.500, 25.000, 37.500 ve 50.000 TL/saat. Mevcut tahmini saatlik duruş maliyeti 25.000 TL'dir ve diğerleri duyarlılık analizi için kullanılmıştır. Hava-Gaz sistemi iki paralel hattan oluştuğu ve bunlardan birinin arızalanması durumunda termik santral %50 performans ile çalışmaya devam edebileceğinden, bu duruş maliyetlerinin termik santral tamamen durduğunda oluşacak olan duruş maliyetlerinin yarısı olduğu unutulmamalıdır. Farklı duruş maliyetlerinin önerilen yöntemler üzerindeki duyarlılığını ölçmek için her biri 50 replikasyon çalıştırılmıştır. Yöntemlerin sınıflandırılmasının her duruş maliyeti altında farklı olup olmadığını gösteren Games-Howell testi sonuçları Tablo 16'da verilmiştir.

Tablo 16. Normalize edilmiş yöntemlerin birim duruş maliyetine duyarlılık sonuçları

DM=12.500 TL					DM=25.000 TL				
Yöntem	Ortalama	Ss	%95 GA	GH	Yöntem	Ortalama	Ss	%95 GA	GH
REMfp	561.100	91.601	(535.067, 587.133)	A	REMwp	1.077.708	185.427	(1.025.010, 1.130.406)	A
REMwp	534.008	71.812	(513.599, 554.417)	A	REMfp	1.059.378	179.497	(1.008.365, 1.110.391)	A,B
RELwp	523.396	74.157	(502.321, 544.471)	A	RELfp	1.001.634	139.627	(961.952, 1.041.316)	A,B
RELfp	517.928	79.355	(495.376, 540.480)	A	RELwp	968.872	152.335	(925.579, 1.012.165)	B
FEMwp	453.092	55.758	(437.246, 468.938)	B	FELwp	857.252	12054	(823.133, 891.371)	C
FELfp	446.376	66.599	(427.449, 465.303)	B	FEMwp	849.198	125.957	(813.402, 884.994)	C
FELwp	443.902	54.721	(428.351, 459.453)	B	FEMfp	823.432	113.416	(791.200, 855.664)	C
FEMfp	431.974	57.309	(415.687, 448.261)	B	FELfp	811.728	132.478	(774.078, 849.378)	C
DM=37.500 TL					DM=50.000 TL				
Yöntem	Ortalama	Ss	%95 GA	GH	Yöntem	Ortalama	Ss	%95 GA	GH
REMwp	1.566.308	279.473	(1.486.883, 1.645.733)	A	REMwp	2.033.002	303.499	(236.959, 414.964)	A
REMfp	1.516.380	318.330	(1.425.912, 1.606.848)	A	REMfp	2.015.694	344.428	(268.915, 470.926)	A
RELwp	1.512.410	263.491	(1.437.527, 1.587.293)	A	RELwp	1.985.284	295.771	(230.926, 404.399)	A
RELfp	1.449.248	223.847	(1.385.631, 1.512.865)	A	RELfp	1.931.700	342.080	(267.082, 467.716)	A
FEMwp	1.288.022	193.420	(1.233.053, 1.342.991)	B	FELwp	1.713.494	216.545	(169.069, 296.075)	B
FELwp	1.262.766	158.064	(1.217.845, 1.307.687)	B	FEMwp	1.637.058	262.559	(204.995, 358.989)	B,C
FEMfp	1.190.410	170.166	(1.142.049, 1.238.771)	B	FEMfp	1.547.436	209.411	(163.499, 286.321)	C
FELfp	1.184.158	167.223	(1.136.634, 1.231.682)	B	FELfp	1.543.092	181.540	(141.739, 248.214)	C

Games-Howell test sonuçlarına göre, farklı duruş maliyetleri yöntemlerin sıralamasını değiştirmektedir. Buna rağmen gruplamanın en küçük üç duruş maliyetinde (12.500, 25.000,

37.500) önemli ölçüde değişmediği ve tüm arıza etkili yöntemlerin en düşük toplam bakım maliyetini verdiği görülmektedir. Saatlik duruş maliyeti 37.500 TL olduğunda, arıza etkili yöntemler kendi aralarında önemli ölçüde farklılaşmasa da, FEL_{fp} ve FEM_{wp} yöntemlerinin maliyetleri arasında önemli bir fark vardır. Duruş maliyeti 50.000 TL olduğunda ise arıza etkili yöntemler içinde FEM_{fp} ve FEL_{fp} 'nin en az toplam bakım maliyetine sahip en iyi yöntemler olarak ayrıştığı görülmektedir. Buna göre, bu iki yöntemin daha yüksek duruş maliyetleri altında toplam bakım maliyetleri açısından üstünlüklerini koruyacağı söylenebilir.

4.2.3 Dengeleme Analizi: Bakım Maliyeti ve Bakım Sayısı

Bir planlama ufkundaki toplam bakım faaliyetlerinin sayısının en aza indirilmesi, bakım maliyetlerinin dikkate alınmasını gerektirmediği için daha kolaydır. Tamamen sistem kullanılabilirliğini arttırmaya konsantre olunabilir. Ancak büyük olasılıkla bu yüksek maliyetle sonuçlanır. Bunun aksine, bakım planlamasında maliyeti en aza indirmek ana hedef olarak düşünüldüğünde, bakım sayısı gözardı edilemez. Bunun nedeni, bir planlama ufkunda ortaya çıkan toplam bakım maliyetinin, gerçekleştirilen toplam bakım faaliyetlerinin sayısı ile doğrudan ilişkili olmasıdır. Bu nedenle, bakım kararlarının alınmasında maliyetin ve sayının etkileri arasında bir denge bulunması önemli olduğundan, verimlilik ölçütlerindeki bileşenlerin bakım maliyetleri ile sonraki olasılıklarının etkisini dengelemek için normalleştirme prosedürü önerilmiştir. Bu prosedür uygulandıktan sonra, normalleştirme uygulanmamış yöntemlerin aksine tüm yöntemlerin tüm bileşenleri dikkate aldığı gözlemlenmektedir.

Bununla birlikte, normalleştirme uygulanmış yöntemlerde planlama ufkunda gerçekleştirilen toplam bakım maliyetiyle birlikte, toplam bakım sayısını da analiz etmek ilgi çekici olabilir. Tablo 14, saatlik duruş maliyeti 25.000 TL olarak alındığında, her yöntem için bileşenlerin bakım dağılımını ve toplam bakım maliyetini göstermektedir. Sonuçlara göre, en düşük bakım maliyetine sahip olan FEL_{fp} yöntemi, en yüksek bakım sayısına sahiptir. Bu tablodaki bakım sayısı dikkate alınarak tek faktörlü ANOVA analizi uygulandığında, p-değeri 0,000 çıkmıştır ve bu da yöntemlerden en az birinin diğerlerine göre istatistiksel olarak farklı bir bakım sayısına sahip olduğunu göstermektedir. ANOVA modelindeki normal dağılım ve sabit varyans varsayımları sağlandığından hangi yöntemlerin farklı olduğunu öğrenmek için Tukey testi uygulanmış ve sonuçları Tablo 17'de verilmiştir.

Bileşenlerin sonraki en kötü durumda olma olasılıklarını kullanan arıza etkili yöntemler, FEM_{fp} ve FEL_{fp} , en yüksek toplam bakım sayısını vermektedir ve diğer yöntemlerden istatistiksel olarak

Tablo 17. Normalize edilmiş yöntemlerin bakım sayısına göre istatistiksel sonuçları .

Yöntem	Bakım Sayısı	Ss	%95 GA	GH
FEL _{fp}	19.38	3.602	(18.356, 20.404)	A
FEM _{fp}	19.30	2.936	(18.465, 20.135)	A
REM _{wp}	16.58	2.548	(15.856, 17.304)	B
REL _{wp}	15.54	2.305	(14.885, 16.195)	B,C
REM _{fp}	15.38	2.440	(14.686, 16.074)	B,C
REL _{fp}	15.16	2.074	(14.571, 15.749)	B,C
FEL _{wp}	15.10	1.992	(14.534, 15.666)	C
FEM _{wp}	15.02	2.199	(14.395, 15.645)	C

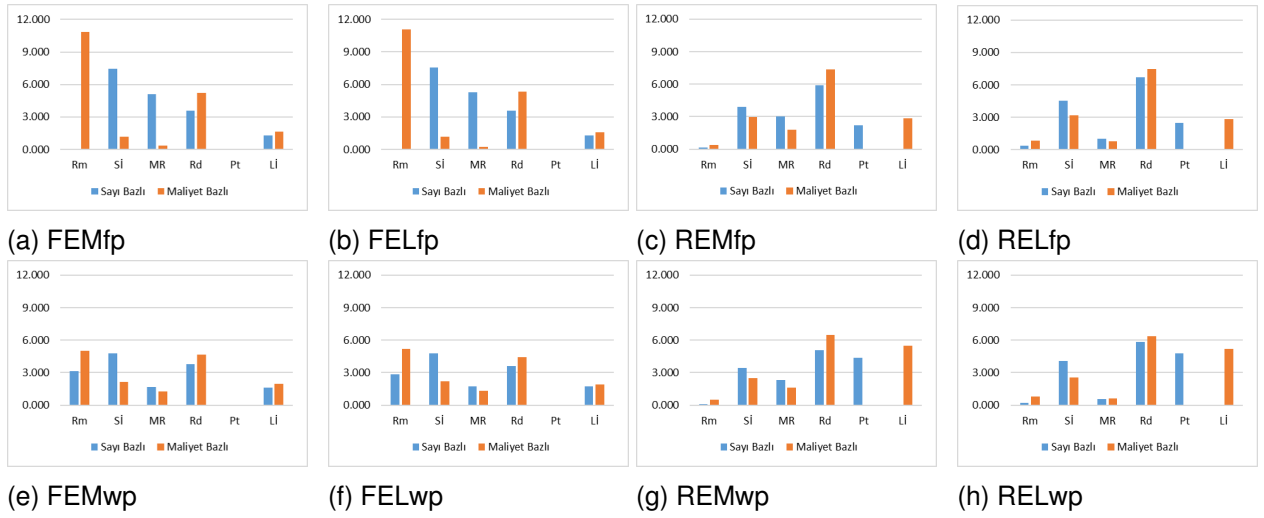
ayrışmaktadır. Ancak bu iki yöntem, toplam bakım maliyeti açısından en iyi yöntemlerdir. Bu sonuç, bir planlama ufkundaki toplam bakım maliyetini azaltmak için toplam bakım sayısının makul ölçüde artmasının kabul edilebilir olduğunu göstermektedir.

4.2.4 Sayı Bazlı ve Maliyet Bazlı Yöntemlerin Bileşen Seviyesinde Analizi

Düzeltici bakım stratejisi altında maliyete dayalı yaklaşımların etkisini değerlendirmek için, sonuçlar verimlilik ölçütlerinde maliyetlerin dikkate alınmadığı bakım sayısına dayalı yöntemlerin sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Şekil 22, her bir yöntemin 50 replikasyon ortalaması için bileşenlerin maliyet bazlı (turuncu sütun) ve sayı bazlı (mavi sütun) dağılımını göstermektedir.

FEM_{fp} ve FEL_{fp} yöntemlerinde, sayı bazlı ve maliyet bazlı yaklaşımlar uygulandığında bazı bileşenlerin toplam bakım sayılarında önemli miktarda fark olduğu görülmektedir. Maliyet dikkate alınmadığında rulman bakımı hiç tercih edilmezken, maliyet dikkate alındığında ise en düşük maliyete sahip olması nedeniyle en çok tercih edilen bileşen olduğu görülmektedir. Öte yandan, Sİ ve MR'nin bakım sayıları, maliyete dayalı yaklaşımlarda önemli ölçüde azalmıştır. REM_{fp} ve REL_{fp} yöntemlerinde, önemli fark olan bileşenler sadece Pt ve Lİ'dur. Sayı bazlı yaklaşımlarda, Pt'e bakım yapılırken, iki bileşen arasındaki yapısal bağımlılık nedeniyle Lİ'na hiçbir zaman bakım yapılmamaktadır. Ancak maliyete dayalı yaklaşımda Lİ' ye bakım yapılırken, Pt daha pahalı bir bileşen olduğu için hiçbir zaman bakıma tabi tutulmaz.

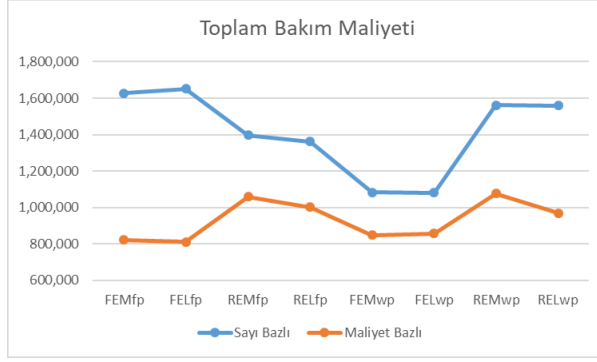
Yöntemlerin “fp” ve “wp” verimlilik ölçütlerine göre karşılaştırılması da ilginç sonuçlar vermektedir. FEM_{fp} ve FEM_{wp} yöntemleri karşılaştırıldığında, arıza etkili yöntemlerde “fp”nin maliyeti olasılıktan daha fazla dikkate alma eğiliminde olduğu gözlemlenirken, “wp”de olasılık etkisi



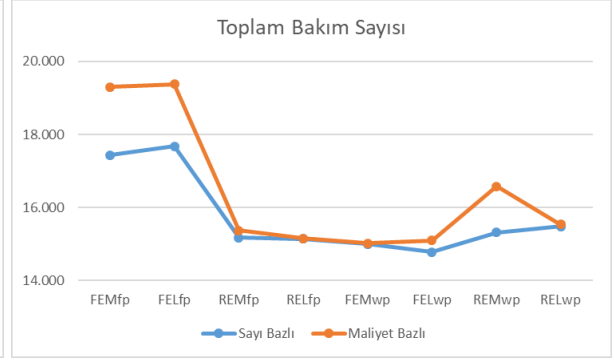
Şekil 22. Sayı bazlı ve maliyet bazlı yöntemlerin bileşen dağılımları

maliyet etkisine nispeten daha fazla hakimdir. FEM_{fp}'de maliyet göz önüne alındığında Sİ ve MR gibi yüksek maliyetli bileşenlerin toplam bakım miktarlarının azalması ve Rm gibi düşük maliyetli bileşenlerin daha fazla bakıma tabi tutulması bu çıkarımın nedenidir. Öte yandan, FEM_{wp}'de ve FEL_{wp}'de, sayı bazlı ve maliyet bazlı yaklaşımlar arasında bileşen sayısı bakımından önemli bir fark yoktur. Değişirme etkili yöntemlerde ise "fp" ve "wp" ölçütleri bileşenlerin dağılımı açısından daha benzer davranmaktadır.

Şekil 23 ve Şekil 24, tüm yöntemler için, maliyet bazlı ve sayı bazlı yaklaşımlar altında planlama ufkundaki toplam bakım maliyetini ve toplam bakım sayısını göstermektedir. Şekillere göre, sayı bazlı ve maliyet bazlı yaklaşımlar arasındaki toplam bakım maliyeti ve toplam bakım sayısı arasındaki en büyük fark FEM_{fp} ve FEL_{fp} yöntemlerine aittir. Bu yöntemlerde, maliyet dikkate alındığında toplam bakım maliyeti azalırken, toplam bakım sayısı artmaktadır. Bu aynı zamanda, FEM_{fp} ve FEL_{fp}'nin maliyet etkisine en fazla odaklanan yöntemler olduğunu da kanıtlamaktadır. Diğer yandan, Şekil 23'te, en az toplam bakım maliyeti farkı FEM_{wp} ve FEL_{wp} yöntemlerine aittir ve benzer şekilde, Şekil 24'e göre, toplam bakım sayısına bağlı olarak da bu yöntemler için iki yaklaşım arasında önemli bir fark yoktur denebilir. Ayrıca, Şekil 23'te maliyet dikkate alındığında REM_{wp} ve REL_{wp}'nin sayı bazlı yaklaşıma göre REM_{fp} ve REL_{fp}'den daha fazla gelişme gösterdiği görülmektedir.



Şekil 23. Toplam bakım maliyeti



Şekil 24. Toplam bakım sayısı

4.3 Luvo Proaktif Bakım Modellemesi Bulguları

Bölüm 3.5'te önerilen proaktif bakım stratejileri (CIPM, DIPM, ThPM) değişik parametrelerle Luvo sisteminin 300 günlük bir planlama ufkunda gerçekleşen toplam bakım maliyetini en azlamak için Bölüm 3.3'te ayrıntıları verilen Luvo DBN modeli ve BNT-toolbox kullanılarak MATLAB ortamında 30 replikasyon çalıştırılmıştır. Proaktif stratejilerin tüm hesapsal analizlerinde reaktif ve proaktif bakım zamanlarında bakım yapılacak bileşeni seçmek için, Bölüm 4.2'de yapılan maliyet bazlı analizler sonucunda, FEL_{fp} metodunun kullanılmasına karar verilmiştir.

Proaktif bakım sonuçlarının analizi için iki ana senaryo ve her biri için reaktif bakımın maliyeti ve süresi ile ilgili üç alt senaryo dikkate alınmıştır. Luvo paralel iki motor grubuna sahip olduğu için, proaktif bakım zamanlarında bu motor grupları içindeki bir bileşene bakım yapılıyorsa sistemin durdurulması gerekmez ve Luvo tek motor grubuyla çalışmaya devam edebilir. Buna bağlı olarak, iki ana senaryo, proaktif bakım sırasında sistemi durdurma ihtiyacına göre tasarlanmıştır. Her senaryoda, proaktif stratejiler (CIPM, DIPM, ThPM) için kullanılan parametrelerin (pci, pdi, thr) değişik seviyeleri değerlendirilmiştir. Pci ve pdi değerlerinin artırılması veya thr değerinin azaltılması, proaktif bakım stratejilerinde ortaya çıkan sonuçları reaktif bakım sonuçlarına yaklaştırmaktadır. Dolayısıyla, pci ve pdi parametrelerinin üst sınırı ve thr parametresinin alt sınırı, ilgili proaktif stratejinin toplam bakım maliyetinin incelenen senaryodaki reaktif bakım maliyetine ulaştığı değerler olarak belirlenmiştir. Öte yandan, çok düşük pci ve pdi değerleri ve çok yüksek thr değerleri gereksiz proaktif bakıma neden olduklarından, ilgili stratejinin en yakın parametre değeri kullanılarak oluşan maliyetten daha yüksek bir toplam bakım maliyetine sebep olur. Bu parametre değerlerine göre de pci ve pdi parametreleri için alt limit ve thr parametresi için üst limit belirlenir.

Tabu süresi belirlenirken çok büyük (sonradan çok kısıtlayıcı hale gelmemesi için) veya çok küçük (sonradan anlamsız hale gelebilir) olmamasına dikkat edilmelidir. Bu nedenle, bazı deneysel çalışmalardan sonra tüm analizlerde tabu süresi 5 gün olarak alınmıştır. Stratejilerin performansı, planlama ufkunda gerçekleşen toplam bakım maliyetine göre değerlendirilmiştir.

Stratejilerin performanslarını karşılaştırmak için ANOVA modeli kullanılmıştır. Model yeterliliği kontrol edilmiş ve tüm modellerin normallik varsayımını sağladığı görülmüştür. Bununla birlikte, bazı ANOVA modelleri sabit varyans varsayımını ihlal etmektedir. Bu durumlarda Games-Howell (GH) kullanılmıştır. Aksi takdirde, Tukey (Tk) testi ile analiz yapılmıştır.

4.3.1 Bağımsız Motor Gruplarına Dayalı Senaryolar

Bu senaryo, iki paralel motor hattının olduğu ve sistemin bu motor gruplarından seçilen bir bileşenin proaktif bakımı için durması gerekmeyeceği ve bu sayede duruş maliyetinin ortaya çıkmadığı gerçek durumu temsil etmektedir. Bununla birlikte, düzeltici bakım ihtiyacı sadece her iki motor grubu durduğunda ortaya çıktığından, paralel hatların avantajı bu durumda geçerli değildir. Bu ana senaryo altında, proaktif bakım sırasında birim duruş maliyeti sabit tutularak, reaktif bakımda farklı birim duruş maliyetlerine dayalı üç alt senaryo oluşturulmuştur.

Senaryo DM_R25

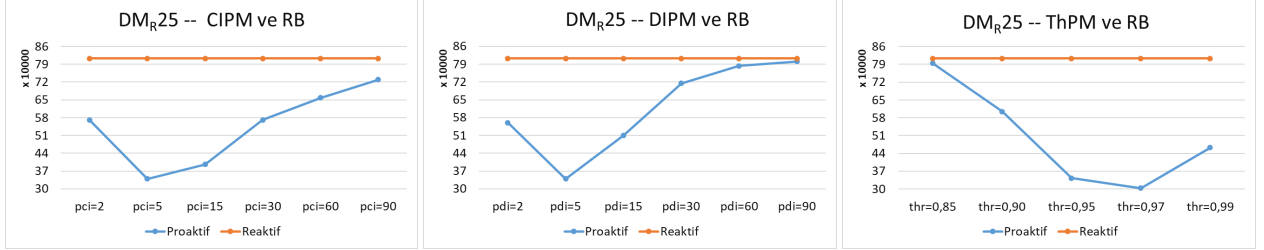
Bu senaryo, tüm bileşenlerin reaktif ve proaktif bakım maliyetlerinin Tablo 8'deki gibi alındığı temel senaryodur. ANOVA modeli sabit varyans varsayımını ihlal ettiğinden, her bakım stratejisinin parametrelerini karşılaştırmak için Games-Howell post-hoc testi uygulanır. 300 günlük planlama ufkundaki toplam bakım maliyetine ait 30 replikasyon sonuçları Tablo 18'de verilmiştir. "RB", reaktif bakımı temsil etmektedir.

Tablo 18. Senaryo DM_R25 için proaktif bakım stratejilerinin karşılaştırma sonuçları

CIPM				DIPM				ThPM			
Faktör	Ortalama	Ss	GH	Faktör	Ortalama	Ss	GH	Faktör	Ortalama	Ss	GH
RB	812.990	113.176	A	RB	812.990	113.176	A	RB	812.990	113.176	A
pci=90	729.100	84.829	B	pdi=90	800.813	107.055	A	thr=0,85	794.085	136.550	A
pci=60	658.547	116.149	B.C	pdi=60	783.510	108.792	A	thr=0,90	604.953	182.613	B
pci=30	571.187	107.290	C.D	pdi=30	714.440	138.026	A	thr=0,99	463.040	28.197	C
pci=2	569.843	49.779	D	pdi=2	560.233	53.831	B	thr=0,95	343.057	101.168	D
pci=15	396.257	98.882	E	pdi=15	509.553	128.893	B	thr=0,97	303.420	58.434	D
pci=5	339.410	56.662	E	pdi=5	339.828	75.966	C				

Sonuçlar, tüm bakım stratejileri için reaktif bakımdan önemli ölçüde daha düşük maliyet

sağlayan en az bir parametre olduğunu göstermektedir. Sabit ve dinamik aralıklı proaktif bakım stratejileri için 5 gün, eşik tabanlı strateji içinse $thr=0,97$ en az maliyeti veren parametrelerdir. Bu durum, bu senaryo için sık proaktif bakıma ihtiyaç duyulduğunu fakat gereksiz bakımdan da kaçınılması gerektiğini göstermektedir.



Şekil 25. Senaryo DM_R25 için proaktif bakım stratejilerinin grafiksel karşılaştırmaları

Şekil 25, her bir strateji için artan parametre değerlerine göre toplam bakım maliyetinin grafiğini ve bunların reaktif bakım maliyetiyle karşılaştırılmasını göstermektedir. CIPM ve DIPM, parametre değerleri arttıkça benzer şekilde davranırken, ThPM stratejisi bu ikisinin aynadaki görüntüsü gibidir. thr parametresinin (pci ve pdi parametrelerinin) artmasıyla (azalmasıyla) daha çok proaktif bakım yapılmasına olanak verilir ve böylece planlama ufkundaki toplam bakım maliyeti azalır, ancak bir kırılma noktasından sonra gereksiz yapılan proaktif bakımlardan ötürü maliyet artar. DIPM ve CIPM, dar proaktif bakım aralıklarında, yani 2 ve 5 günde, neredeyse aynı maliyet değerleriyle sonuçlanırken; aralık genişlediğinde, DIPM maliyeti reaktif bakım maliyetine daha hızlı yaklaşmaktadır. Bu durum, dinamik aralıklı strateji kullanılırken, planlanan iki önleyici bakım arasında reaktif bir bakıma ihtiyaç duyulduğunda sonraki proaktif bakım zamanının ileriye ötelenmesinden ve bunun sonucunda da CIPM'ye kıyasla daha az (daha fazla) proaktif (reaktif) bakım yapılmasından kaynaklanır. Böylece, artan reaktif bakım sayısı nedeniyle toplam bakım maliyeti de artar.

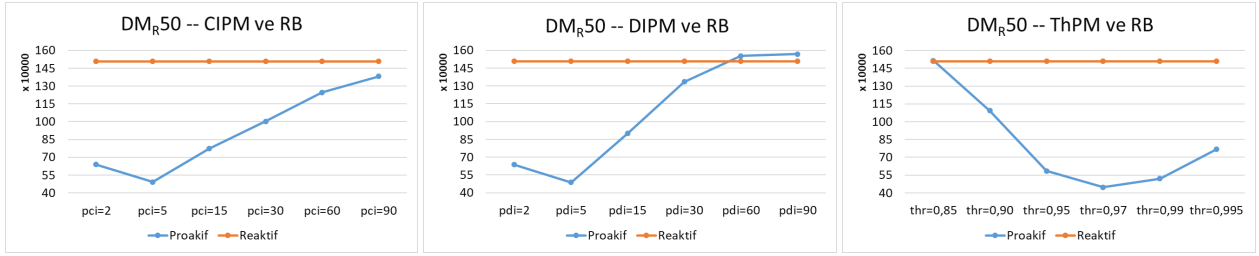
Senaryo DM_R50

İkinci senaryoda, daha önce düşük elektrik fiyatına (0,20 TL/kw) dayalı olarak firmalarla anlaşma yapılmışken iç piyasa fiyatlarının aniden 0,65 TL/kw gibi çok yüksek bir değere yükseldiği kötümser bir yaklaşım düşünülmüştür. Bu durumda, proaktif ve reaktif duruş maliyetleri sırasıyla yaklaşık 20.000 TL/saat ve 25.000 TL/saat olarak hesaplanmıştır. Sonuçlar Tablo 19 ve Şekil 26'te gösterilmiştir.

Sonuçlara göre, 5 gün hem CIPM hem de DIPM için en iyi sonucu veren parametre değeridir. ThPM'de ise 0,97, 0,99 ve 0,95 güvenilirlik eşikleri minimum maliyeti vermektedir. Öte yandan, bir

Tablo 19. Senaryo DM_R50 için proaktif bakım stratejilerinin karşılaştırma sonuçları

CIPM				DIPM				ThPM			
Faktör	Ortalama	Ss	GH	Faktör	Ortalama	Ss	GH	Faktör	Ortalama	Ss	GH
RB	1.508.150	181.300	A	pdi=90	1.568.133	205.506	A	thr=0,85	1.514.588	215.080	A
pdi=90	1.383.025	162.591	A,B	pdi=60	1.553.275	266.095	A	RB	1.508.150	181.300	A
pdi=60	1.247.132	213.617	B	RB	1.508.150	181.300	A,B	thr=0,90	1.093.598	286.436	B
pdi=30	1.002.885	202.155	C	pdi=30	1.335.845	259.728	B	thr=0,995	767.653	82.401	C
pdi=15	772.232	214.363	D	pdi=15	899.697	245.286	C	thr=0,95	585.782	201.297	D
pdi=2	639.673	110.493	D	pdi=2	637.687	85.915	D	thr=0,99	520.915	67.143	D
pdi=5	490.910	117.018	E	pdi=5	487.282	126.608	E	thr=0,97	447.710	167.359	D



Şekil 26. Senaryo DM_R50 için proaktif bakım stratejilerinin grafiksel karşılaştırmaları

önceki senaryoda, reaktif duruş maliyeti 25.000 TL olduğunda, 0,97 ve 0,95 thr değerleri en iyisidir ve istatistiksel olarak birbirlerinden önemli ölçüde ayrılmamakta ancak 0,99 değeri onlardan daha kötü sonuç vermektedir. Bu durumdan reaktif bakımın duruş maliyeti arttıkça daha fazla proaktif bakım yapılmasının daha avantajlı hale geldiği ve dolayısıyla daha düşük toplam maliyet sağladığı sonucuna varılabilir.

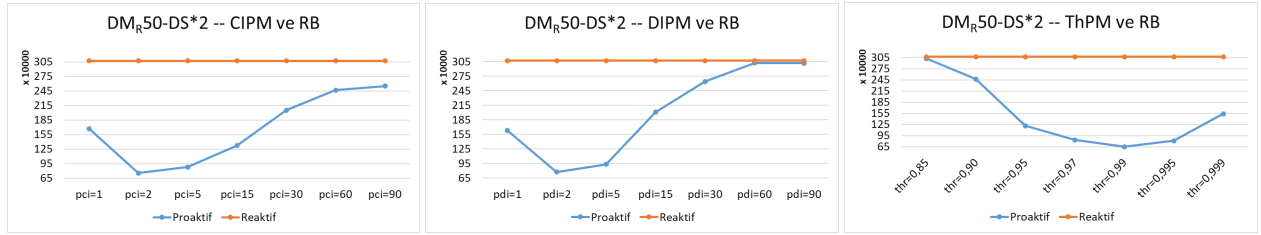
Senaryo DM_R50-2*DS

Üçüncü olarak, ekonomik bir kriz olduğunu ve işten çıkarılmalar sonucunda önceden planlanmamış reaktif bakımın hızla gerçekleştirilemeyeceğinin öngörüldüğü daha kötümser bir senaryo tasarlanmıştır. Buna göre, reaktif bakım eylemlerinin duruş süreleri 2 katına çıkarılmıştır. Bu, her eylemin reaktif bakım maliyetinde de bir artışa neden olmaktadır. İkiye katlanan reaktif duruş sürelerinin yanı sıra, bir önceki senaryoda açıklanan nedenlerden dolayı reaktif duruş maliyeti de 50.000 TL/saat olarak alınmıştır. Tablo 20, replikasyonların karşılaştırma sonuçlarını ve Şekil 27, her bir strateji için toplam bakım maliyetini grafiksel olarak göstermektedir.

Sonuçlara göre, 2 günlük ve 5 günlük parametreler hem CIPM hem de DIPM için en iyi aralıklardır ve ilgili strateji içinde önemli ölçüde birbirlerinden farklı değildirler. ThPM'de ise, 0,99, 0,995 ve 0,97 eşik seviyeleri en düşük bakım maliyetlerini verirler ve 0,95 parametresinden önemli ölçüde farklıdır. Bu sonuçlar, reaktif bakım yapılmasının büyük bir maliyet oluşturduğu böyle

Tablo 20. Senaryo DM_{R50-2}^*DS için proaktif bakım stratejilerinin karşılaştırma sonuçları

CIPM				DIPM				ThPM			
Faktör	Ortalama	Ss	GH	Faktör	Ortalama	Ss	GH	Faktör	Ortalama	Ss	GH
RB	3.072.683	475.618	A	RB	3.072.683	475.618	A	RB	3.072.683	475.618	A
pci=90	2.549.158	468.636	B	pdi=60	3.023.847	488.502	A	thr=0,85	3.028.380	561.275	A
pci=60	2.468.732	360.075	B	pdi=90	3.021.160	500.477	A	thr=0,90	2.473.207	648.184	B
pci=30	2.049.825	411.459	C	pdi=30	2.643.295	660.310	A	thr=0,999	1.539.012	129.953	C
pci=1	1.671.372	161.985	D	pdi=15	2.011.895	582.416	B	thr=0,95	1.214.898	518.435	D
pci=15	1.324.710	348.467	E	pdi=1	1.633.573	104.908	C	thr=0,97	833.015	264.002	E
pci=5	877.810	202.740	F	pdi=5	934.773	255.623	D	thr=0,995	812.990	118.105	E
pci=2	755.177	193.740	F	pdi=2	774.073	169.836	D	thr=0,99	651.698	196.147	E



Şekil 27. Senaryo DM_{R50-2}^*DS için proaktif bakım stratejilerinin grafiksel karşılaştırmaları

kötümser bir senaryoda, reaktif bakımı önlemek için daha sık proaktif bakıma ihtiyaç duyulduğunu göstermektedir. Bununla birlikte, 0,99'dan yüksek güvenilirlik eşik değeri kullanılması veya pci ve pdi'nin 1 gün olarak alınması, gereksiz proaktif bakımın sonucunda toplam bakım maliyetini artırır. Ayrıca, ThPM stratejisinin CIPM ve DIPM'den daha düşük bir minimum toplam maliyete ulaşmada daha başarılı olduğu belirtilmelidir. Stratejiler arasında en iyi performansı veren parametreler ile yapılan karşılaştırmalar Bölüm 4.3.3'te ele alınacaktır.

Tartışılan tüm senaryolarda DIPM ve CIPM stratejileri benzer şekilde davrandığı, ancak proaktif bakım aralıkları genişledikçe, DIPM'nin RB stratejisine daha hızlı yaklaştığı görülmektedir. Bunun nedeni, proaktif bakımlar arasındaki süre arttıkça daha fazla reaktif bakıma ihtiyaç duyulmasıdır. DIPM'de kullanılan dinamik aralık nedeniyle, proaktif bakım zamanları ötelenmekte ve bu da reaktif bakım ihtiyacını artıracığından toplam bakım maliyetini de artıracaktır.

4.3.2 Bağımlı Paralel Motor Gruplarına Dayalı Senaryolar

Bölüm 4.3.1'deki senaryolarda, reaktif bir bakım yapılabilmesi için sistemin durdurulması gerekliken, proaktif bakım için bu gerekli değildir. Bu durumda proaktif bakım yapmak toplam

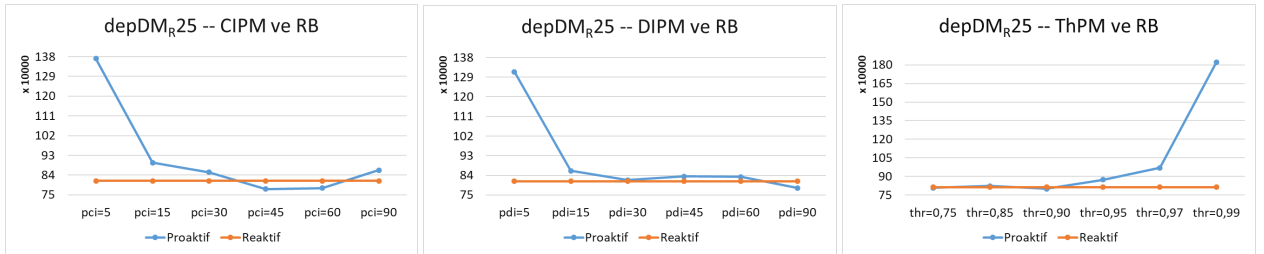
bakım maliyetini azaltmak açısından oldukça avantaj sağlamaktadır. Proaktif bakım yapılırken de sistemin durdurulması gereken bağımlı bir sistemde proaktif bakımın hangi durumlarda avantaj sağlayıp sağlamayacağını görmek için başka bir ana senaryo tasarlanmıştır. Bu senaryoda sistem hem proaktif hem de reaktif bakım sırasında elektrik üretmeye devam edemediğinden, her ikisinde de tüm bakım eylemleri duruş maliyetine sebep olacaktır. Bu senaryo da, Bölüm 4.3.1’de bahsedilen tüm alt senaryolar ve önerilen üç proaktif bakım stratejisi için 30 replikasyon çalıştırılmıştır.

Senaryo depDM_R25

Bu senaryoda, tüm bileşenlerin saatlik proaktif ve reaktif duruş maliyetleri sırasıyla 20.000 TL ve 25.000 TL olarak alınmıştır. Duruş süreleri, Tablo 8’de verilen sürelerle aynıdır. Her bir strateji için replikasyon sonuçları Tablo 21’de ve Şekil 28’de gösterilmiştir.

Tablo 21. Senaryo depDM_R25 için proaktif bakım stratejilerinin karşılaştırma sonuçları

CIPM				DIPM				ThPM			
Faktör	Ortalama	Ss	Tk	Faktör	Ortalama	Ss	Tk	Faktör	Ortalama	Ss	Tk
pci=5	1.371.632	84.708	A	pdi=5	1.314.080	71.977	A	thr=0,99	1.820.468	70.485	A
pci=15	896.750	118.529	B	pdi=15	860.923	128.510	B	thr=0,97	968.652	69.521	B
pci=90	861.858	133.908	B,C	pdi=45	835.497	144.658	B	thr=0,95	872.307	96.427	C
pci=30	853.227	123.612	B,C	pdi=60	833.427	114.897	B	thr=0,85	822.928	139.546	C
RB	812.990	113.176	B,C	pdi=30	817.995	107.112	B	RB	812.990	113.176	C
pci=60	781.005	126.373	C	RB	812.990	113.176	B	thr=0,75	806.593	104.865	C
pci=45	776.202	133.158	C	pdi=90	782.293	94.332	B	thr=0,90	800.207	123.541	C



Şekil 28. Senaryo depDM_R25 için proaktif bakım stratejilerinin grafiksel karşılaştırmaları

Sonuçlar, tüm stratejilerde, RB’in maliyetinden önemli ölçüde daha düşük maliyet veren hiçbir parametre olmadığını göstermektedir. Aksine, gereksiz yapılan proaktif maliyetlerden ötürü stratejilerin bazı parametreleri daha yüksek bakım maliyetine neden olmaktadır. CIPM ve DIPM için denenen parametre değerleri içinde, 5 gün en kötü sonucu vermektedir ve proaktif bakımlar arasındaki aralık artarken, toplam bakım maliyetinin azaldığı görülmektedir. CIPM ve DIPM’de en kötü maliyeti veren 5 değeri hem ilgili parametresinin diğer değerlerinden hem de

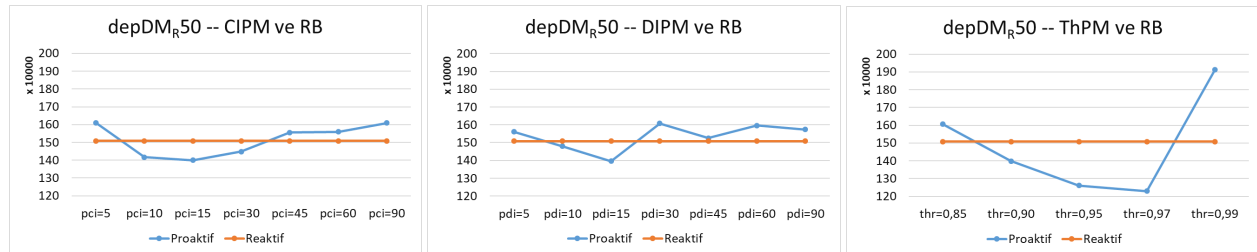
reaktif bakımdan istatistiksel olarak önemli ölçüde farklıdır. ThPM'de daha sık proaktif bakım yapan parametre değerleri, thr=0,97 ve thr=0,99 olup RB ve diğer eşik seviyelerinden istatistiksel olarak ayrışmalarının yanı sıra, birbirlerinden de önemli ölçüde farklıdırlar ve en yüksek maliyet sonuçlarını vermektedirler. Daha küçük diğer eşik parametreleri RB ile neredeyse aynı maliyeti vermektedirler. Sonuçlar, proaktif bir bakım stratejisi kullanmanın bu senaryoda verilen maliyet yapısı altında herhangi bir avantaj sağlamadığını göstermektedir.

Senaryo depDM_R50

Bu senaryoda, tüm bileşenlerin hem reaktif hem de proaktif bakım için sistemin durdurulması gereklidir ve reaktif duruş maliyeti Bölüm 4.3.1'de anlatılan nedenler sebebiyle 50.000 TL olarak alınmıştır. Sonuçlar, Tablo 22 ve Şekil 29'da verilmiştir.

Tablo 22. Senaryo depDM_R50 için proaktif bakım stratejilerinin karşılaştırma sonuçları

CIPM				DIPM				ThPM			
Faktör	Ortalama	Ss	Tk	Faktör	Ortalama	Ss	Tk	Faktör	Ortalama	Ss	Tk
pci=2	3.234.358	181.300	A	pdi=2	3.263.513	98.797	A	thr=0,99	1.912.942	149.836	A
pci=5	1.610.330	217.801	B,C	pdi=30	1.607.462	241.444	B	thr=0,85	1.606.567	229.963	B
pci=90	1.608.683	229.191	B,C	pdi=60	1.595.673	233.141	B	RB	1.508.150	181.300	B,C
pci=60	1.559.500	207.912	B,C	pdi=90	1.574.220	249.517	B,C	thr=0,90	1.397.760	244.947	C,D
pci=45	1.555.900	175.201	B,C	pdi=5	1.560.697	168.177	B,C	thr=0,95	1.260.420	220.126	D,E
RB	1.508.150	181.300	B,C	pdi=45	1.525.210	269.834	B,C	thr=0,97	1.228.858	217.561	E
pci=30	1.447.768	221.860	B,C	RB	1.508.150	181.300	B,C				
pci=15	1.400.557	186.110	C	pdi=15	1.395.637	236.102	C				



Şekil 29. Senaryo depDM_R50 için proaktif bakım stratejilerinin grafiksel karşılaştırmaları

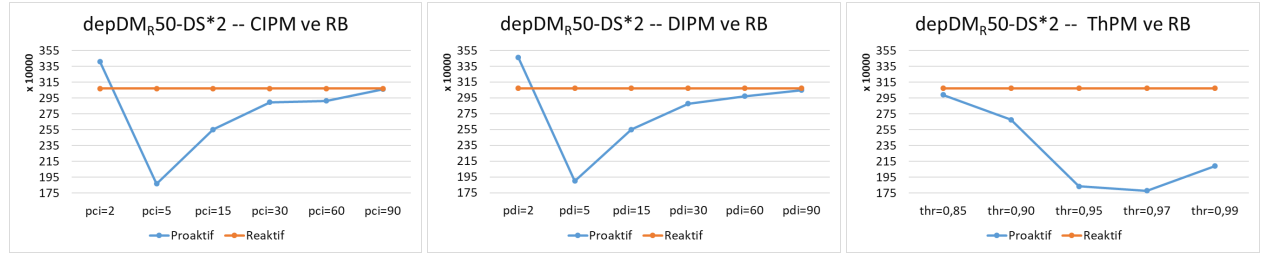
CIPM ve DIPM stratejileri için, reaktif bakımdan önemli ölçüde daha iyi sonuç veren bir parametre yoktur. Bununla birlikte, ThPM'de 0,97 ve 0,95 eşikleri en iyileridir ve RB'dakinden önemli ölçüde daha düşük maliyet vermektedir. thr=0,97'ye kadar güvenilirlik eşik seviyesi arttıkça bakım maliyeti azalmaktadır. Eşik seviyesi 0,99'a yükseldiğinde ise gereksiz proaktif bakımın sonucu olarak maliyet de büyük ölçüde artmaktadır. Eşiğe dayalı proaktif stratejisi RB'inkinden daha düşük toplam bakım maliyetini sağlamayı başardığı için, bu senaryoda ThPM'nin en iyi strateji olduğu sonucuna varılabilir.

Senaryo depDM_R50-2*DS

Önceki senaryoya ek olarak, bu senaryoda bileşenlerin reaktif bakım süreleri de Bölüm 4.3.1'de açıklanan argümanlar nedeniyle iki katına çıkarılır. Replikasyon sonuçları Tablo 23 ve Şekil 30'da gösterilmektedir.

Tablo 23. Senaryo depDM_R50-2*DS için proaktif bakım stratejilerinin karşılaştırma sonuçları

CIPM				DIPM				ThPM			
Faktör	Ortalama	Ss		Faktör	Ortalama	Ss		Faktör	Ortalama	Ss	
pci=2	3.411.912	271.384	A,B	pdi=2	3.459.180	261.008	A	RB	3.072.683	475.618	A
RB	3.072.683	475.618	B	RB	3.072.683	475.618	B	thr=0,85	2.991.852	546.488	A
pci=90	3.062.532	390.982	B	pdi=90	3.046.507	459.494	B	thr=0,90	2.675.882	620.795	A
pci=60	2.914.787	390.891	B,C	pdi=60	2.972.570	407.950	B	thr=0,99	2.089.465	268.921	B
pci=30	2.896.617	457.727	B,C	pdi=30	2.877.380	523.580	B,C	thr=0,95	1.833.235	497.400	B,C
pci=15	2.554.793	514.663	C	pdi=15	2.550.208	456.090	C	thr=0,97	1.777.223	415.788	C
pci=5	1.867.830	411.877	D	pdi=5	1.900.833	328.620	D				



Şekil 30. Senaryo depDM_R50-2*DS için proaktif bakım stratejilerinin grafiksel karşılaştırmaları

Sonuçlara göre, her strateji için, RB'dan önemli ölçüde daha iyi olan en az bir parametre vardır. CIPM ve DIPM'de beş günlük aralık en düşük maliyeti verirken iki günlük aralık, gereksiz proaktif bakım yapılması nedeniyle bu stratejilerde en yüksek maliyeti vermektedir. ThPM, 0,97 eşik seviyesinde en düşük maliyeti verir ve bu eşik, RB'dan ve thr=0,95'in dışındaki diğer parametre değerlerinden istatistiksel olarak önemli ölçüde farklıdır. Ayrıca, ThPM stratejisinde denenen tüm parametre değerleri RB'dan daha düşük maliyet vermektedir. Bu sonuçlar, sistemdeki paralel hatların operasyonu birbirine bağlı olsa bile, reaktif bakım maliyeti yeterince yüksekse, proaktif bakımın toplam bakım maliyetini azaltırken sistemi sürdürülebilir tutmada avantaj sağladığını göstermektedir.

4.3.3 En İyi Parametreler Kullanılarak Proaktif Bakım Stratejilerinin Karşılaştırılması

Hangi bakım stratejisinin daha iyi olduğunu anlamak için, her bir stratejinin, her senaryoda RB'dan istatistiksel olarak önemli ölçüde daha düşük maliyeti veren en iyi performansa sahip parametreleri birbirleriyle karşılaştırılmıştır. Stratejilerin hiçbirinin RB'dan önemli ölçüde düşük bir maliyet veremediği depDM_R25 senaryosu ve sadece bazı ThPM parametrelerinin RB'dan önemli ölçüde daha düşük maliyet verdiği depDM_R50 senaryosu karşılaştırmalara alınmamıştır. Tablo 24, toplam bakım maliyeti ve toplam bakım sayısına göre karşılaştırma sonuçlarını göstermektedir.

Tablo 24. En iyi strateji parametrelerinin senaryolar bazında karşılaştırılması

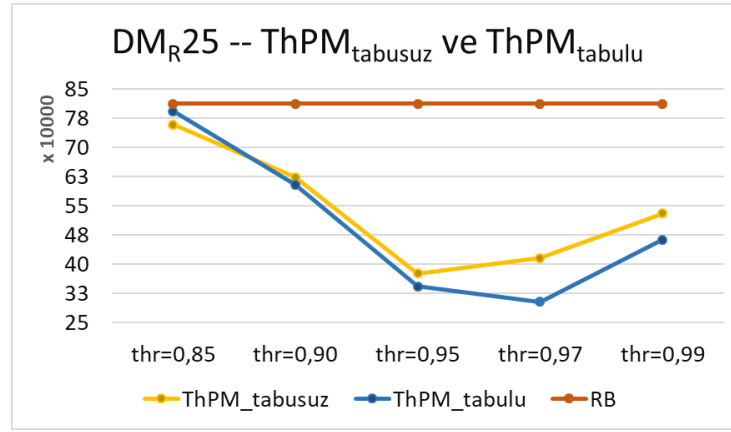
Senaryo	Parametre	B. Maliyeti	Ss	Tk	Parametre	B. Sayısı	Ss	GH
DM _R 25	pdi=5	339.410	56.662	A	pdi=5	65,00	1,702	A
	pci=5	339.828	75.966	A	pdi=5	62,20	1,243	B
	thr=0,97	303.420	58.434	A	thr=0,97	51,30	4,348	C
DM _R 50	pdi=5	490.910	117.018	A	pdi=5	65,57	1,716	A
	pdi=5	487.282	126.608	A	pdi=5	62,77	1,524	B
	thr=0,97	447.710	167.359	A	thr=0,97	49,20	3,624	C
DM _R 50-2*DS	pdi=2	774.073	169.836	A	pdi=2	150,67	1,155	A
	pci=2	755.177	193.740	A,B	pdi=2	150,27	0,785	A
	thr=0,99	651.698	196.147	B	thr=0,99	100,50	3,481	B
depDM _R 50-2*DS	pdi=5	1.900.833	328.620	A	pdi=5	63,00	2,197	A
	pci=5	1.867.830	411.877	A	pdi=5	61,40	1,276	B
	thr=0,97	1.777.223	415.788	A	thr=0,97	40,93	2,116	C

Bakım maliyetine göre stratejiler arasında neredeyse önemli bir fark olmamasına rağmen, eşişe dayalı bakım (ThPM) her senaryoda en düşük maliyete sahiptir. Öte yandan, toplam bakım sayısına göre stratejiler karşılaştırıldığında, ThPM en iyisidir. Eşişe dayalı bakım, bakım kararları alınırken sistemin gerçek durumunun dikkate alındığı kestirimci bir strateji olduğundan, proaktif bakım yalnızca gerektiğinde uygulanır. Böylece hem bakım sayısını hem de bakım maliyetini düşürür. Bu sonuçlar, eşişe dayalı bakım stratejisinin bu senaryolar altında önerilen proaktif stratejiler içinde en iyisi olduğunu göstermektedir.

4.3.4 Tabu Prosedürünün Kullanılmasının Gerekçesi

Bakım kararları alınırken tabu prosedürünün neden kullanıldığının daha iyi anlaşılabilmesi için, önerilen proaktif stratejiler tabu prosedürü kullanılmadan tekrar 30 replikasyon alınmıştır. DM_R25 senaryosunda ThPM stratejisinin parametre değerleri için toplam bakım maliyeti, tabu

prosedürünün kullanıldığı ve kullanılmadığı iki durum için Şekil 31’de gösterilmiştir. Ayrıca şekilde reaktif bakım maliyeti de verilmiştir. Maliyet değerine göre iki durum arasındaki en büyük fark tabu prosedürü ile en düşük maliyeti veren $thr=0,97$ 'ye aittir. Tüm parametre seviyelerinde, maliyet değerlerinin normal dağılıma uygunluğu onaylandıktan sonra, tabu olmadan ve tabu kullanılarak elde edilen sonuçların karşılaştırılmaları için t-test kullanılmıştır. t-test sonucuna göre 0,97 ve 0,99 eşikleri için sıfır p-değeri elde edilirken, diğerleri arasında önemli bir fark olmadığı bulunmuştur. Güvenilirlik eşiği düştükçe, proaktif bakım sıklığının azaldığı ve bunun da neredeyse tüm proaktif bakım zamanlarında boş bir tabu listesine sebep olduğu düşünülürse, sonuçların mantıklı olduğu söylenilebilir. Öte yandan, $thr=0,99$ olduğunda p-değeri sıfır olmasına rağmen, maliyet farkı bir önceki eşik değerine kıyasla daha küçüktür çünkü bu eşikte fazla proaktif bakım yapıldığı için 5 günlük bir tabu süresi uzun bir tabu listesine neden olur ve bu da tabuyu çok kısıtlayıcı bir hale getirireceğinden bakım için uygun bileşenin seçilmesini engeller.



Şekil 31. $thr=0,97$ 'de tabulu ve tabusuz sonuçların kıyaslanması

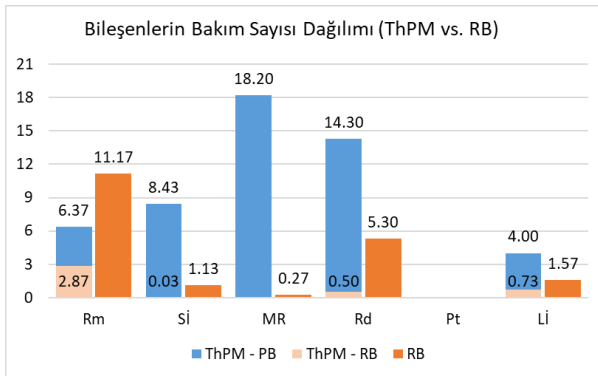
ThPM proaktif bakım stratejisinde $thr=0,97$ için tabu prosedürü kullanılarak ve kullanılmayarak alınan replikasyonlarda, planlama ufkunda bakımı planlanan bileşenlerin dağılımı da analiz edilmiştir. Proaktif (PB) ve reaktif bakıma (RB) ait sonuçlar Tablo 25’de verilmiştir. Tabu kullanılmayan senaryoda mil-rotora çok fazla proaktif bakım yapıldığı görülmektedir. $thr=0,97$ 'de, proaktif bakım sıklıkla yapılmaktadır ve bu yüzden bileşenlerin güvenilirlikleri çoğunlukla yüksek kalmaktadır. Bu da proaktif bakım dönemlerinde maliyet değerlerini daha etkili hale getirmektedir. DM_{R25} senaryosunda proaktif bakım maliyeti en düşük olan bileşen mil-rotor olduğu için, bakım zamanlarında sürekli bu bileşen seçilmektedir. Tabu kullanılan replikasyonların sonuçları analiz edildiğinde ise, bileşenlerin dağılımının daha dengeli olduğu görülmektedir çünkü her proaktif bakım zamanında aynı bileşenin seçilmesi tabu prosedürüyle engellenmiştir.

Tablo 25. thr=0,97'de tabulu ve tabusuz replikasyonlarda bileşenlerin dağılımı

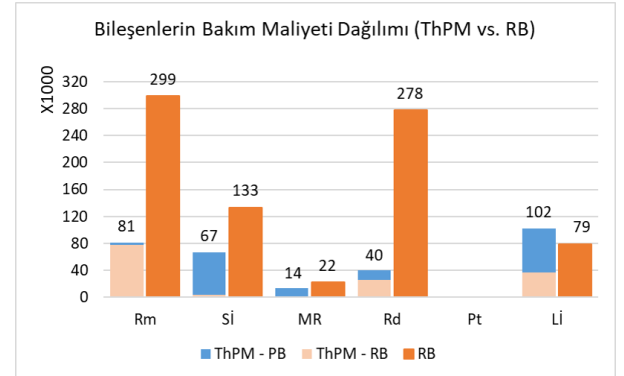
		Bileşenler										Toplam	Ss
		Rm1	Si1	MR1	Rd1	Rm2	Si2	MR2	Rd2	Pt	Li		
Tabusuz	PB	0,00	3,23	50,47	6,23	0,00	2,97	48,87	6,60	0,00	1,13	127,17	24,83
	RB	2,90	0,00	0,00	0,30	2,53	0,00	0,00	0,10	0,00	1,83		
Tabulu	PB	1,73	4,37	8,77	6,77	1,77	4,03	9,43	7,03	0,00	3,27	51,30	4,35
	RB	1,47	0,03	0,00	0,13	1,40	0,00	0,00	0,37	0,00	0,73		

4.3.5 Bileşenlerin Bakım Sayısı ve Bakım Maliyeti Dağılımı

Şekil 32a ve 32b, DM_R25 senaryosunda Luvo bileşenlerinin ThPM ve reaktif bakım stratejileri altında sayı ve maliyet açısından dağılımını göstermektedir. Şekillerdeki, mavi ve açık turuncu sütunlar ThPM proaktif bakım stratejisi altında sırasıyla proaktif bakımı ve reaktif bakımı; turuncu sütunlar ise reaktif bakım stratejisi altındaki bakımı göstermektedir. Şekil 32a hem ThPM'de hem de reaktif stratejide reaktif bir bakım uygulandığında, Si ve MR'un bakım için çok az seçildiğini göstermektedir. Bunun yerine, Rm, en az duruş süresi ve dolayısıyla en düşük bakım maliyetine sahip olması nedeniyle bakım için ön plana çıkmaktadır. ThPM'de en sık proaktif bakım, eylem maliyetleri ve sonraki olasılıkları nedeniyle MR ve Rd'e aittir. Bunun sebebi, proaktif bakımda, paralel motor gruplarındaki bileşenlerin bakımı sırasında sistemin durmasına gerek olmadığı için duruş süresi maliyetinin oluşmamasıdır. Bu bileşenlerin en yüksek bakım sayısına sahip olmasına rağmen en düşük proaktif bakım maliyetini sağladığını gösteren Şekil 32b de bu sonucu doğrulamaktadır. Si da motor grubunun bir bileşeni olmasına rağmen, ThPM stratejinde proaktif bakım zamanlarında MR ve Rd kadar tercih edilmez. Buna rağmen, Si en yüksek eylem maliyetine sahip olması nedeniyle MR ve Rd'ye kıyasla maliyet dağılımında daha fazla paya sahiptir.



(a) Bakım sayısı dağılımı



(b) Bakım maliyeti dağılımı

Şekil 32. DC_R25'de bileşenlerin bakım sayısı ve bakım maliyeti dağılımları

4.4 POMDP Çözücülerinin Karşılaştırmaları

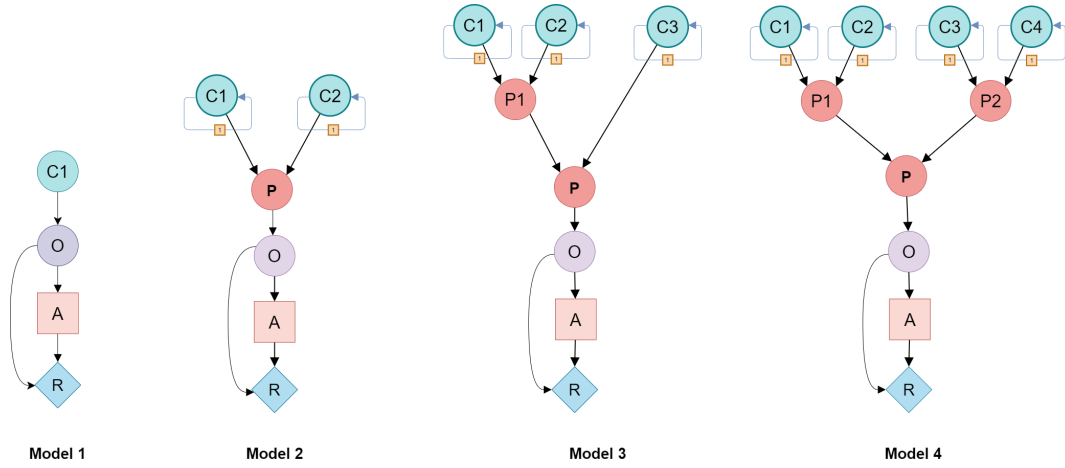
Bu bölümde, kısmen gözlemlenebilir stokastik olarak bozulan bakım problemlerine yönelik Bölüm 2.3'te detayları verilen, çözüm yöntemleri bakımından farklı özelliklere sahip seçilmiş dört POMDP çözücüsünün karşılaştırmalı analizleri yapılmıştır. İlk hedef kesin bir çözüme ulaşmaktır, ancak daha önce de belirtildiği gibi, kesin yöntemler büyük durum uzaylarına sahip problemlerde zorlanırlar. Bu nedenle, farklı karmaşıklık düzeylerindeki problemleri çözerek çözüm yöntemlerinin performansını araştırmak için hem kesin hem de yaklaşık algoritmalara başvurulmuştur.

4.4.1 Deneylerin Kurgusu

Kurulacak bakım modeli için öncelikli amaç kesin çözücüler ile optimal çözüme ulaşmaktır. Bu sebeple ilk olarak durum-uzayı küçük olan bir bakım problemi kurgulanmıştır. Daha sonra durum uzayları dereceli olarak artırılarak problemin boyutu genişletilmiştir. Kurgulanan sistem 4 ayrı aşamada incelenmiştir: 1, 2, 3 ve 4 bileşene sahip bu modeller ile ilgili bileşenler ve süreçler arasındaki ilişkiler iki zaman dilimi için Şekil 33'te gösterilmektedir. Modelin temsilini karmaşıkleştirmamak adına eylemlerin bileşen üzerine etkileri gösterilmemiştir. Tüm bileşenlerin ve süreçlerin iki durumu {Ç, B} vardır: "Ç", çalışıyor ve "B", bozulmuş durumlarını ifade etmektedir. Gözlem düğümünün de iki durumu {Y, K} vardır: "Y", yeşil ve "K", kırmızı gözlem durumlarını gösterir. C1, C2, C3 ve C4 bileşenlerinin geçiş olasılıkları; P1, P2, P düğümlerinin ve gözlem düğümünün koşullu olasılıkları sırasıyla Tablo 26, 27, 28 ve 29'da verilmiştir.

DeneySEL bakım modelleri ile ilgili varsayımlar aşağıdaki gibidir:

- 1-bileşenli ilk modelde bileşen düğümünün yanında yalnızca gözlem düğümü bulunmaktadır. 2 ve daha fazla bileşenli modellerde ise bunlara ilaveten süreç düğümleri bulunmaktadır.
- Bileşenler zaman içinde yıpranmakta veya bozulmaktadır. Model kurgularında eklenen tüm bileşenler aynı olasılıklarla yıpranmakta veya bozulmaktadır.
- Tüm bileşenler herhangi bir zamanda değiştirilebilir.
- Herhangi bir zaman noktasında, bileşenlerin en fazla birisi değiştirilebilir.
- Bileşenlerin ve süreçlerin doğrudan gözlemlenmesi mümkün değildir. Ancak, gözlem düğümü tarafından tahmin edilirler.



Şekil 33. POMDP çözücü karşılaştırması için kurulan modeller

- Bütün bileşenler, başlangıçta “çalışıyor” durumundadır.
- Ödüller -bakım modelleri için maliyetler- eylemler ve gözlemlerden toplanır.

Tablo 26. Bileşenlerin geçiş olasılıkları

Kendi [t-1]	Ç	B
Ç	0,95	0
B	0,05	1

Tablo 27. P1 ve P2'nin olasılıkları

C2	Ç		B	
C1	Ç	B	Ç	B
Ç	1	0,5	0,5	0
B	0	0,5	0,5	1

Tablo 28. P'nin olasılıkları

P2	Ç		B	
P1	Ç	B	Ç	B
Ç	1	0	0	0
B	0	1	1	1

Tablo 29. O'nun olasılıkları

P	Ç	B
yeşil	0,95	0
kırmızı	0,05	1

Bakım maliyetleri, alınan gözlemlere ve yapılan bakım işlemine bağlıdır. Toplam bakım maliyeti, duruş maliyeti ve ilgili bileşenin yenilenme maliyetinden oluşur. Duruş maliyeti, sistemin durmasından kaynaklanan üretimdeki kayıp maliyetidir. Yeşil bir sinyal gözlemlendiğinde bileşenleri yenileme maliyetleri sırası ile 100 TL, 200 TL, 300 TL, 400 TL; kırmızı bir sinyal gözlemlendiğinde ise bileşenleri yenileme maliyetleri sırası ile 200 TL, 400 TL, 600 TL, 800 TL'dir. Sistemden, yeşil bir sinyal alındığında 2.500 TL; kırmızı bir sinyal alındığında ise bundan daha fazla bir duruş maliyeti ortaya çıkar. Her bileşenin toplam bakım maliyeti, alınan gözleme ve yapılan eyleme bağlı olarak Tablo 30'da verilmiştir. Tabloda, kırmızı sinyal gözlemlendiğindeki duruş maliyeti parametrik olarak gösterilmiştir.

Tablo 30. POMDP çözücü karşılaştırması için kurulan modellerdeki maliyet yapısı

Eylem	Gözlem	
	Yeşil	Kırmızı
Bir şey yapma	0	Duruş Maliyeti + 200
C1'i yenile	2.600	Duruş Maliyeti + 400
C2'yi yenile	2.700	Duruş Maliyeti + 600
C3'ü yenile	2.800	Duruş Maliyeti + 800
C4'ü yenile	2.900	Duruş Maliyeti + 1.000

4.4.2 POMDP Çözücüleri

DeneySEL problemler klasik POMDP olarak formüle edilmiş ve politika üretmek için kesin algoritmaları kullanan çözücülerden biri olan POMDP-Solve (PS) (The POMDP Page, 2020) ve yaklaşık algoritmaları kullanan SARSOP (Kurniawati vd., 2008; Du vd., 2020) ile çözdürülmüştür. Eş zamanlı olarak aynı modeller faktörlü temsillerle gösterilmiş, çözüm için yaklaşık çözüm algoritmalarından Symbolic Perseus kullanan Symbolic Perseus-Java (SPJ) (Hoey, 2020) ve Symbolic Perseus-MATLAB (SPM) (Poupart, 2005; Poupart, 2020) çözücüleri ile çözdürülmüştür.

Yapılan çalışmalar sonucunda, kesin algoritmaları kullanan PS çözücüsü, en fazla 2-bileşenli

modeli çözebilmiş, sonraki daha büyük boyutlu modellerde başarılı bir politika üretememiştir. Daha önce de bahsedildiği gibi kesin algoritmalar büyük durum uzaylı problemleri çözmekte başarılı olmadıkları için yaklaşık algoritmaların kullanımı ve gelişimi artmıştır. Yaklaşık algoritma olarak SARSOP ve Symbolic Perseus (SP) algoritmalarını kullanan çözümler kullanılmıştır. SARSOP çözümleri klasik POMDP temsilinde girdi dosyalarıyla, SPJ ve SPM ise faktörlü temsilli girdi dosyalarıyla politika üretebilmektedir. Her biri politika üretmek için farklı zaman ve hesaplama performansı talep eden bu çözümlerden en iyi zaman ve hesaplama performansını sağlayacak olan çözümleri seçmek için Model 3 ve Model 4'ün çözümü için 3 yaklaşık çözümler (SARSOP, SPJ, SPM) kullanılmıştır.

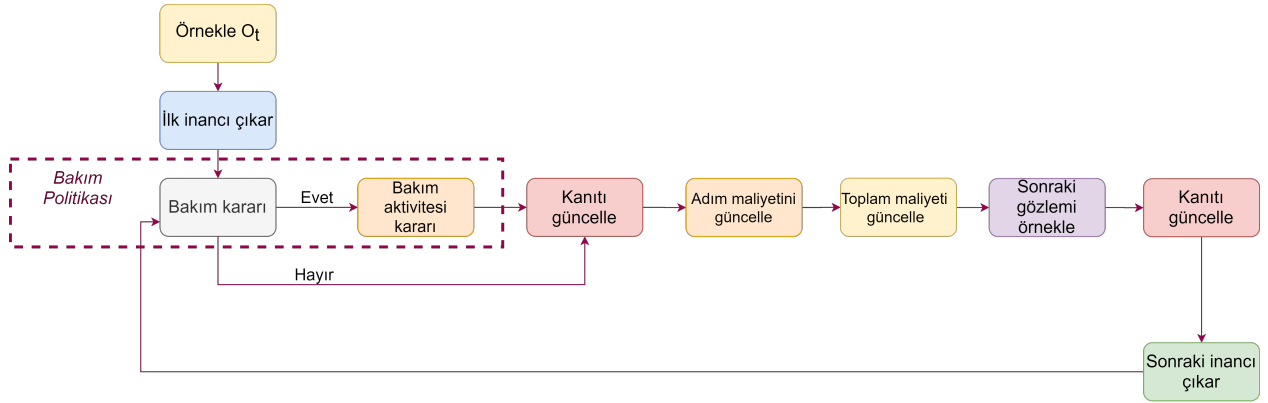
SARSOP çözümleri en iyi çözüme ulaşabilmek için oldukça uzun süreler çalışabilmektedir. Bu sebeple algoritmanın içinde halihazırda var olan zaman kısıtı fonksiyonundan faydalanılmış, en ideal zaman kısıtını bulabilmek amacı ile farklı zaman kısıtları ile politikalar üretilmiş, bu politikalar 100 günlük bir planlama ufku için DBN'ler kullanılarak simüle edilmiş ve simülasyonlar 50 kez tekrarlanmıştır. Model 4 için 10.000 TL duruş maliyetinde sırasıyla 300, 600, 900 ve 1200 saniye için elde edilen politikaların simülasyon sonuçları karşılaştırılmış ve toplam maliyet bakımından birbirinden istatistiksel olarak farklı olmadığı görülmüştür. Bunun üzerine SARSOP'un zaman kısıtı tüm modeller için 300 saniye olarak ayarlanmıştır.

4.4.3 Genel Bakım Politika Simülasyonu

POMDP çözümleri, problemler için politikalar üretirler ve üretilen politikalar, DBN'ler kullanılarak simüle edilmiştir. DBN modelini oluşturmak, gözlemleri örneklemek ve inanç durumlarını çıkarmak için BNT araç kutusu (Murphy, 2001) kullanılarak Matlab'de kodlama yapılmıştır. Bakım politikası simülasyonunun genel akışı Şekil 34'te verilmektedir.

4.4.4 Deneylerin Sonuçları

Tüm POMDP modellerinde indirim faktörü 0,999 olarak ayarlanmıştır. İlk olarak PS çözümleri, kesin politika oluşturmak için çalıştırılmıştır. Aynı zamanda, yaklaşık politikalar SARSOP, SPJ ve SPM çözümleri ile elde edilmiş ve tüm politikalar 100 günlük planlama ufku 50 kez simüle edilmiştir. PS, SARSOP ve SPJ tarafından oluşturulan politikaların simülasyonları için problemler BNT araç kutusu kullanılarak DBN ile de modellenmiş ve Matlab'de kodlama yapılmıştır. SPM tarafından üretilen politikalar ise aynı parametrelerle kendi sahip olduğu simülatöründe



Şekil 34. POMDP çözümleri ile genel bakım politika simülasyonu

yürütülmüştür.

Duruş maliyeti sırasıyla 5.000, 10.000 ve gerektiğinde 55.000 TL alınmıştır. Farklı duruş maliyetlerinde POMDP çözümlerinin davranışlarını incelemek ve planlama ufku boyunca ortalama toplam bakım maliyeti açısından performanslarını karşılaştırmak için kurulan ANOVA modellerinde normal dağılım ve eşit varyans varsayımları kontrol edilmiştir. Tüm modellerde artıkların normal dağılıma uyduğu fakat varyansların eşit kabul edilemeyeceği görülmüştür. Böylece, analizler farklı varyanslara sahip olan örneklemeler olduğunda kullanılabilen Games-Howell (GH) testi ile yapılmıştır (Games ve Howell, 1976). Bu test sonucunda raporlanan aynı harf, aralarında istatistiksel olarak fark olmayan yöntemleri gösterirken farklı harflere sahip yöntemlerin arasında anlamlı bir farkın olduğu söylenir. Tüm testlerde anlamlılık seviyesi $\alpha=0.05$ alınmıştır.

Model 1 Sonuçları

Duruş maliyeti 5.000 TL iken Model 1 üzerinde çözümlerin bakım politikalarının karşılaştırılması ile ilgili sonuçlar Tablo 31'de verilmiştir. Tabloda, TMaliyet, 100 günlük ufukta oluşan toplam maliyeti, TKırmızı, aynı ufukta alınan toplam kırmızı sinyal sayısını ve TBakım toplam bileşen bakım sayısını belirtir. Bu ölçümlerin replikasyonlar boyunca ortalamaları (Ort) ve standart sapmaları (Ss) tabloda raporlanmıştır.

Çözümlerin performansları elde ettikleri politikaların planlama ufku boyunca oluşturdukları ortalama toplam maliyet ile ölçülmüştür. Karşılaştırmanın Games-Howell test sonuçları Tablo 32'de verilmiştir. Duruş maliyeti 5.000 TL iken Model 1'i çözen SPM hariç POMDP çözümlerinin politikalarının hemen hemen reaktif davrandığı, bileşen yenilemelerini yalnızca kırmızı sinyalde yaptırdığı, ancak nadir de olsa bazı kırmızı sinyallerde bakım yaptırmadığı belirlenmiştir. SPM

Tablo 31. Model 1 için çözücülerin bakım politikalarının karşılaştırılması, DM= 5.000

	TMaliyet		TKırmızı		TBakım		Bileşenlerin Bakımları
	Ort	Ss	Ort	Ss	Ort	Ss	C1
SPM	46.074	14.917	9,32	3,01	9,32	3,01	9,32
SPJ	46.912	13.891	9,48	2,81	9,44	2,74	9,44
PS	44.424	14.843	9,00	3,02	8,60	2,70	8,60
SARSOP	47.939	15.402	9,70	3,11	9,04	2,78	9,04

Tablo 32. Model 1 için GH test sonuçları, DM= 5.000

Yöntem	Ort. Bakım Maliyeti	Ss	%95 GA	GH Grup
SPM	44.214	14.726	(40.029, 48.399)	A
SPJ	46.912	13.891	(42.964, 50.860)	A
PS	44.424	14.843	(40.205, 48.642)	A
SARSOP	47.939	15.402	(43.562, 52.316)	A

ise tamamen reaktif bir politika üretmiştir. Çözücülerin politikalarının ortalama bakım maliyetleri istatistiksel olarak incelendiğinde aralarında anlamlı bir fark bulunmamıştır.

Reaktif bakımın önüne geçmek amacı ile daha proaktif bir politika üretmeleri gereken durumlarda çözücülerin politikalarının davranışını incelemek için duruş maliyeti 10.000 TL'ye çıkarılmıştır. Böylece çözücü daha proaktif bir politika üretmeye teşvik edilmiştir. Duruş maliyeti 10.000 TL için Model 1 üzerinde ilgili çözücülerin bakım politikalarının karşılaştırılması ve Games-Howell test sonuçları Tablo 33 ve Tablo 34'te verilmiştir.

Tablo 33. Model 1 için çözücülerin bakım politikalarının karşılaştırılması, DM= 10.000

	TMaliyet		TKırmızı		TBakım		Bileşen Bakımları
	Ort	Ss	Ort	Ss	Ort	Ss	C1
SPM	91.132	27.061	9,40	2,80	9,40	2,80	9,40
SPJ	86.218	21.252	8,86	2,19	8,86	2,19	8,86
PS	96.896	24.073	10,00	2,50	9,44	2,37	9,44
SARSOP	86.970	28.758	8,98	2,97	8,50	2,84	8,50

Model 1'de tüm performans bir bileşenden alınmaktadır ve sistemin yaşlanma olasılığı oldukça küçüktür. Dolayısıyla 10.000 TL duruş maliyetinde de sistem ele alınan dört çözücünün politikasına göre reaktif stratejiye çok yakın davranmaya devam etmiştir (SPM ve SPJ tamamen reaktif bir politika üretmiştir). Bu sebeple yalnızca bu model için 55.000 TL duruş maliyeti ile de sonuçlar alınmıştır. Duruş maliyeti 55.000 TL için çözücülerin bakım politikalarının karşılaştırılması

Tablo 34. Model 1 için GH test sonuçları, DM= 10.000

Yöntem	Ort. Bakım Maliyeti	Ss	%95 GA	GH Grup
SPM	91.132	27.061	(83.441, 98.822)	A
SPJ	86.218	21.252	(80.178, 92.258)	A
PS	96.896	24.073	(90.055, 103.738)	A
SARSOP	86.970	28.758	(78.797, 95.144)	A

ve Games-Howell analiz sonuçları Tablo 35 ve Tablo 36'da verilmiştir. Çözücülerin buldukları politikaların davranışları burada ayrılmıştır. SPM ve SPJ reaktif stratejiye yakın davranırken, PS ve SARSOP kırmızı görsün ya da görmesin her periyotta bakım yapmışlardır. Buna rağmen çözücülerin politikalarının ortalama maliyetleri karşılaştırıldığında çözücüler arasında istatistiksel olarak anlamlı bir fark bulunmamıştır.

Tablo 35. Model 1 için çözücülerin bakım politikalarının karşılaştırılması, DM= 55.000

	TMaliyet		TKırmızı		TBakım		Bileşen Bakımları
	Ort	Ss	Ort	Ss	Ort	Ss	C1
SPM	482.051	132.810	9,02	3,02	10,02	3,02	10,02
SPJ	495.960	116.784	9,40	2,52	10,32	2,51	10,32
PS	511.269	118.109	5,28	2,36	100,00	0,00	100,00
SARSOP	482.104	107.912	4,70	2,16	100,00	0,00	100,00

Tablo 36. Model 1 için GH test sonuçları, DM= 55.000

Yöntem	Ort. Bakım Maliyeti	Ss	%95 GA	GH Grup
SPM	482.051	132.810	(458.216, 533.705)	A
SPJ	495.960	116.784	(448.862, 515.241)	A
PS	511.269	118.109	(477.703, 544.835)	A
SARSOP	482.104	107.912	(451.436, 512.772)	A

Model 2 Sonuçları

Bir sonraki adımda bileşen sayısı ikiye çıkarılmış, Model 1 için yapılan tüm deneysel analizler, aynı parametreler ile Model 2 için yinelenmiştir. Duruş maliyeti 5.000 TL alındığında Model 2 için çözücülerin bakım politikalarının karşılaştırılması ve Games-Howell analiz sonuçları Tablo 37 ve Tablo 38'de verilmiştir. Duruş maliyeti 5.000 TL iken Model 2'nin POMDP çözücü politikalarının hemen hemen reaktif stratejiye yakın davrandığı gözlemlenmiştir. Ayrıca, çözücülerin politikalarının ortalama bakım maliyetleri arasında anlamlı bir fark bulunmamıştır.

Tablo 37'de PS çözücüsünün politika davranışını incelediğimizde 100 periyotluk planlama

Tablo 37. Model 2 için çözücülerin bakım politikalarının karşılaştırılması, DM= 5.000

	TMaliyet		TKırmızı		TBakım		Bileşen Bakımları	
	Ort	Ss	Ort	Ss	Ort	Ss	C1	C2
SPM	80.398	20.520	15,94	4,07	15,94	4,07	7,28	8,66
SPJ	77.128	20.110	15,36	4,00	15,32	3,98	9,36	5,96
PS	80.093	16.118	15,98	3,20	15,72	2,99	9,26	6,46
SARSOP	75.209	18.307	14,98	3,63	14,78	3,59	8,86	5,92

Tablo 38. Model 2 için GH test sonuçları, DM= 5.000

Yöntem	Ort. Bakım Maliyeti	Ss	%95 GA	GH Grup
SPM	80.398	20.520	(74.566, 86.230)	A
SPJ	77.128	20.110	(71.413, 82.843)	A
PS	80.093	16.118	(75.512, 84.674)	A
SARSOP	75.209	18.307	(70.007, 80.412)	A

ufkunda toplam kırmızı sinyal gözlemlene ortalaması 15,98 iken toplam bileşen yenileme ortalaması 15,72'dir. Bu farklılığın nedeni politika dosyasında tespit edilmiş, simülasyon sırasında da doğrulanmıştır. PS politikasında peşpeşe periyotlarda iki bileşen de yenilendiğinde bir sonraki periyotta kırmızı görse bile "Bir şey yapma" önerilmektedir. Simülasyon sırasında bu durum ender olduğu için TKırmızı, TBakım'dan çok az küçük olacak şekilde sonuçlanmaktadır.

Tablo 39. Model 2 için çözücülerin bakım politikalarının karşılaştırılması, DM= 10.000

	TMaliyet		TKırmızı		TBakım		Bileşen Bakımları	
	Ort	Ss	Ort	Ss	Ort	Ss	C1	C2
SPM	140.877	37.483	13,28	3,83	17,70	3,96	9,62	8,08
SPJ	153.786	37.193	13,72	3,45	21,70	5,04	11,24	10,46
PS	138.354	38.749	12,48	3,77	19,04	4,82	10,02	9,02
SARSOP	154.747	38.415	13,96	3,73	21,14	4,72	11,16	9,98

Tablo 40. Model 2 için GH test sonuçları, DM= 10.000

Yöntem	Ort. Bakım Maliyeti	Ss	%95 GA	Games-Howell Grup
SPM	140.877	37.483	(130.225, 151.530)	A
SPJ	153.786	37.193	(143.216, 164.356)	A
PS	138.354	38.749	(127.342, 149.367)	A
SARSOP	154.747	38.415	(143.829, 165.664)	A

İki ve daha fazla bileşenli sistemlerde bileşenler beraber çalışarak sistem performansını etkiledikleri için 10.000 TL duruş maliyetinde proaktif politikalar elde edilmiştir. Sisteme yeni

bileşen eklendikçe ilişkilerin olasılığından ötürü sistemin duruş olasılığı artmaktadır. Duruş maliyeti 10.000 TL alındığında Model 2 için çözümlerin bakım politikalarının karşılaştırılması ve Games-Howell analiz sonuçları Tablo 39 ve Tablo 40'ta verilmiştir. Ele alınan dört farklı çözümlerin bulunduğu politikaların önerdiği bakım sayıları farklı olsa da ürettikleri politikalar simüle edildiğinde elde edilen maliyetler arasında istatistiksel olarak anlamlı bir fark bulunmamaktadır.

Model 3 Sonuçları

Bir sonraki adımda bileşen sayısı üçe çıkarılmıştır. İlk iki model için yapılan tüm deneysel analizler, aynı parametreler ile bu model için yinelenmiştir. Duruş maliyeti 5.000 TL alındığında Model 3 için çözümlerin bakım politikalarının karşılaştırılması ve Games-Howell analiz sonuçları Tablo 41 ve Tablo 42'de verilmiştir.

Tablo 41. Model 3 için çözümlerin bakım politikalarının karşılaştırılması, DM= 5.000

	TMaliyet		TKırmızı		TBakım		Bileşen Bakımları		
	Ort	Ss	Ort	Ss	Ort	Ss	C1	C2	C3
SPM	125.910	24.985	24,56	4,82	24,56	4,82	7,98	9,54	7,04
SPJ	120.400	24.598	23,54	4,76	23,54	4,76	9,80	7,32	6,42
SARSOP	128.838	26.854	21,58	4,86	31,80	5,69	6,90	11,08	13,82

Tablo 42. Model 3 için GH test sonuçları, DM= 5.000

Yöntem	Ort. Bakım Maliyeti	Ss	%95 GA	GH Grup
SPM	125.910	24.985	(118.810, 133.011)	A
SPJ	120.400	24.598	(113.410, 127.391)	A
SARSOP	128.838	26.854	(121.207, 126.470)	A

PS çözümlüsü Model 3'te bir politika üretememiş ve kendiliğinden programdan çıkmıştır. Öngörülen gerçek hayat modeli bu problemden daha büyük bir durum uzayına sahip olacağından, çözümlü olarak PS'un kesin olarak kullanılmamasına karar verilmiştir. Tablo 41'de gözlemlendiği üzere Model 3'te diğer 3 çözümlünün davranışı da duruş maliyeti 5,000 TL iken ayrışmaya başlamıştır. SPM ve SPJ hep reaktif davranırken SARSOP proaktif de davranmıştır. Buna rağmen Tablo 42 sonuçlarına göre üç yöntemin politika maliyetleri arasında anlamlı bir fark bulunmamaktadır.

Duruş maliyeti 10.000 TL alındığında Model 3 için çözümlerin bakım politikalarının karşılaştırılması ve Games-Howell analiz sonuçları Tablo 43 ve Tablo 44'te verilmiştir. Bu duruş maliyetinde artık her üç çözümlü de proaktif davranmaktadır. Ancak içlerinde en çok proaktif davrananın SARSOP olduğu görülmektedir. Buna rağmen Tablo 44 sonuçlarına göre üç yöntemin

Tablo 43. Model 3 için çözümlerinin bakım politikalarının karşılaştırılması, DM= 10.000

	TMaliyet		TKırmızı		TBakım		Bileşen Bakımları		
	Ort	Ss	Ort	Ss	Ort	Ss	C1	C2	C3
SPM	238.303	51.034	22,10	5,08	30,00	5,57	11,90	10,28	7,82
SPJ	230.465	48.016	21,08	4,73	29,58	5,47	10,08	11,30	8,20
SARSOP	239.357	45.057	20,38	4,48	34,70	5,60	11,78	10,26	12,66

Tablo 44. Model 3 için GH test sonuçları, DM= 10.000

Yöntem	Ort. Bakım Maliyeti	Ss	%95 GA	GH Grup
SPM	238.303	51.034	(223.799, 252.806)	A
SPJ	230.465	48.016	(216.818, 244.111)	A
SARSOP	239.357	45.057	(226.552, 252.162)	A

politika maliyetleri arasında anlamlı bir fark bulunmamaktadır.

Model 4 Sonuçları

Model 4'te bileşen sayısı dörde çıkarılarak sistem biraz daha karmaşıklaştırılmıştır. Duruş maliyeti 5.000 TL iken çözümlerinin bakım politikalarının karşılaştırılması ve Games-Howell analiz sonuçları Tablo 45 ve Tabl 46'da verilmiştir. Duruş maliyeti 5.000 TL iken Model 4'ün POMDP çözümlerinin hemen hemen reaktif stratejiye yakın davrandığı gözlemlenmiş olup çözümlerinin politikalarının ortalama bakım maliyetleri arasında anlamlı bir fark bulunmamıştır.

Tablo 45. Model 4 için çözümlerinin bakım politikalarının karşılaştırılması, DM= 5.000

	TMaliyet		TKırmızı		TBakım		Bileşen Bakımları			
	Ort	Ss	Ort	Ss	Ort	Ss	C1	C2	C3	C4
SPM	164.960	24.493	31,72	4,67	31,72	4,67	9,68	7,80	8,08	6,16
SPJ	163.855	26.602	31,50	5,07	31,46	5,10	9,52	8,40	7,16	6,38
SARSOP	167.380	27.164	33,38	5,30	33,16	5,37	9,42	7,58	5,46	10,70

Tablo 46. Model 4 için GH test sonuçları, DM= 5.000

Yöntem	Ort. Bakım Maliyeti	Ss	%95 GA	GH Grup
SPM	164.960	24.493	(157.999, 171.921)	A
SPJ	163.855	26.602	(156.294, 171.415)	A
SARSOP	167.380	27.164	(159.660, 175.101)	A

Duruş maliyeti 10.000 TL alındığında Model 4 için çözümlerinin bakım politikalarının karşılaştırılması ve Games-Howell analiz sonuçları Tablo 47 ve Tablo 48'de verilmiştir. Her üç

çözücü de proaktif bakım politikaları üretmiştir. Ancak SPM ve SPJ politikaları Model 3'teki gibi benzer davranırken SARSOP'un Model'ten farklı olarak diğer iki çözücüye göre daha az proaktif bakım yaptığı söylenebilir. Ancak Tablo 48 sonuçlarına göre üç yöntemin politika maliyetleri arasında anlamlı bir fark bulunmamaktadır.

Tablo 47. Model 4 için çözücülerin bakım politikalarının karşılaştırılması, DM= 10.000

	TMaliyet		TKırmızı		TBakım		Bileşen Bakımları			
	Ort	Ss	Ort	Ss	Ort	Ss	C1	C2	C3	C4
SPM	320.049	49.691	29,86	4,74	38,04	5,91	7,44	8,84	11,64	10,12
SPJ	318.678	56.267	28,06	5,29	42,76	6,85	9,58	11,38	12,10	9,70
SARSOP	329.223	56.513	31,20	5,60	37,68	5,90	6,70	11,20	10,38	9,40

Tablo 48. Model 4 için GH test sonuçları, DM= 10.000

Yöntem	Ort. Bakım Maliyeti	Ss	%95 GA	GH Grup
SPM	320.049	49.691	(305.927, 334.171)	A
SPJ	318.678	56.267	(302.687, 334.669)	A
SARSOP	329.223	56.513	(313.163, 345.284)	A

4.4.5 Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Bu deneysel çalışmada kesin çözümlerin büyük durum uzaylı modelleri çözemedikleri açıkça görülmüştür. Bu sebeple ilerleyen bölümlerde POMDP-Solve çözücüsünün kullanılmayacağına karar verilmiştir. Yaklaşık çözümler arasında toplam maliyet analizinde anlamlı bir fark olmadığı ortaya koyulmuştur. Bu çalışmada, çözümün iki aşaması vardır. İlk aşamada, her çözücü kendi karakteristik çözüm metotları ile eylemleri ve bu eylemlerin karşılığı olan α -vektörleri içeren birer politika dosyası üretirler. Daha önce de belirtildiği gibi, ikinci aşamada PS, SARSOP ve SPJ çözücülerinin politikalarını planlama ufku boyunca simüle edip politika davranışlarını inceleyebilmek için tüm problemler DBN ile de modellenmiş ve Matlab'de BNT araç kutusu kullanılarak bir simülasyon kodu yazılmıştır. Faktörlü temsil yapısı kullanan ve politika çıktısını faktörlü olarak veren SPM çözücüsünün ise kendi içinde bir simülasyon kodu bulunmaktadır. Bu kodun üzerinde bazı değişiklikler yaparak SPM politika simülasyon çıktılarını diğer çözümler için geliştirilen simülasyon kodunun çıktılarıyla aynı olacak hale getirilmiştir. SPM çözücüsünün simülasyon süresi diğer çözümlere göre çok daha azdır. Yaklaşık çözümler arasında toplam maliyet analizi açısından anlamlı bir fark bulunmadığından termik santral bakım modelini incelerken, simülasyon zamanı avantajından dolayı ve faktörlü temsil yapısını kullandığından çok-

bileşenli sistemleri modellemeye daha uygun olduğundan dolayı faktörlü POMDP çözücüsü olan SPM'in kullanılmasına karar verilmiştir.

4.5 Deneysel Bir Sistemin Faktörlü POMDP'lerle Modelleme Bulguları

Kısmen gözlemlenebilir sistemlerin bakım problemlerinde karar vermek oldukça zordur çünkü bu tür ortamlarda iki belirsizlik kaynağı vardır. İlk olarak, bir eylem yapıldıktan sonra, MDP'lerde olduğu gibi bir sonraki duruma ilişkin net bir bilgi yoktur. İkincisi, karar verici eksik bilgi nedeniyle mevcut süreç durumunu da tam olarak bilmez, ancak aldığı gözlemlerle tahmin etmeye çalışabilir. POMDP modeli bu belirsizlikleri ele alarak ve bakım faaliyetlerini optimize ederek güçlü ve uygun bir çerçeve sunar.

Bu bölümde, gerçek hayattaki bakım problemlerinin karmaşıklığını temsil etmek için dört-bileşenli (C1, C2, C3, C4) bir deneysel bakım sistemi kurulmuştur. Bu sistem faktörlü POMDP olarak ele alınıp Bölüm 4.4'te bu çalışmada kullanılmasına karar verilen faktörlü POMDP çözücüsü SPM ile değişik senaryolar altında çözdürülüp yaklaşık politikalar elde edilecektir. Ayrıca POMDP çözücüsü tarafından elde edilen bakım politikasının performansını karşılaştırmak için önceden tanımlanmış bazı proaktif ve reaktif bakım politikaları da problem üzerinde simüle edilecektir.

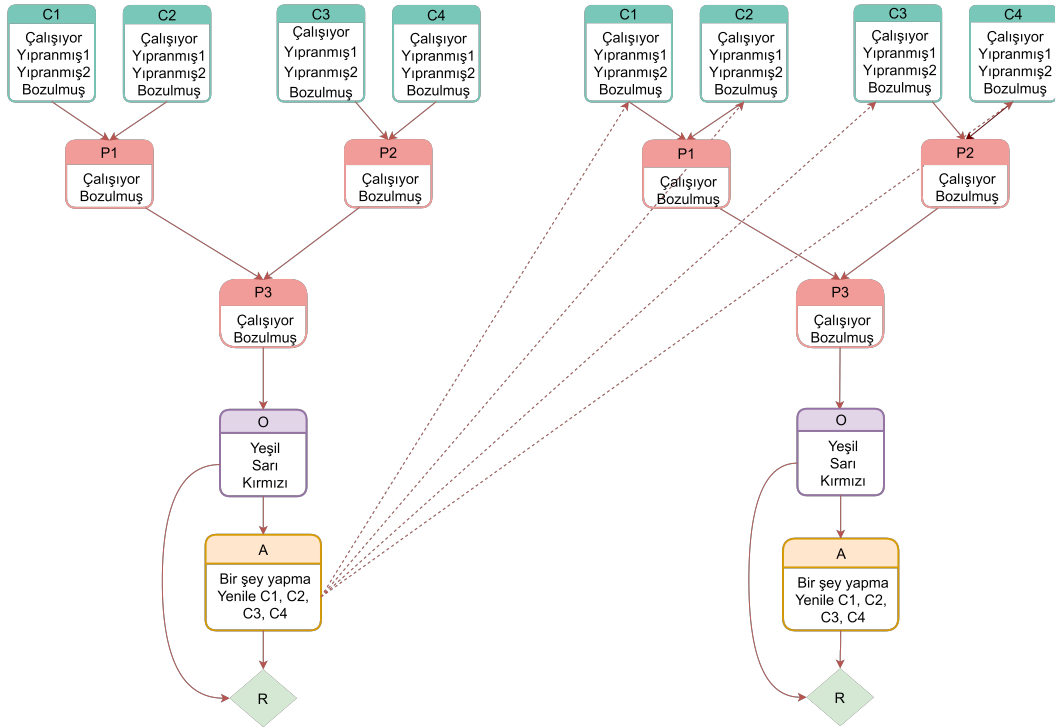
Kurulan deneysel bakım sistemi, bileşen düğümleri, bileşelerin etkileşimlerine bağlı olan süreç düğümleri ve gözlem düğümünü içermektedir. Bileşenler ve süreçler arasındaki ilişki Şekil 35'te gösterilmiştir. Bileşenlerin ve süreçlerin doğrudan gözlemlenmesi mümkün değildir. Bununla birlikte, sistem durumları, gözlem düğümünden elde edilen ölçümlerle veya sinyallerle tahmin edilebilir. Bileşenler zaman içinde yıpranmakta veya bozulmaktadır. Tüm bileşenlerin herhangi bir zamanda değiştirilebileceği varsayılmaktadır. Tüm bileşenlerin ilk durumları "çalışıyor" olarak belirlenmiştir.

4.5.1 Değişken Yapısı

- Modelde her bileşen 4 duruma sahiptir: "Çalışıyor", "Yıpranmış1", "Yıpranmış2" ve "Bozulmuş". "Yıpranmış2" durumunun "Yıpranmış1" durumundan daha kötü olduğu varsayılmıştır.
- Bileşenler arasındaki etkileşimin sonucu olarak süreçler tanımlanmaktadır (C1 ve C2'nin etkileşimi ile P1; C3 ve C4'ün etkileşimi ile P2). P3 ana süreç düğümü ise sistemin

performansına işaret etmektedir ve doğrudan P1 ve P2 süreç düğümlerine bağlıdır.

- Ana süreç düğümü P3, doğrudan bilgi toplamak için kullanılan gözlemlenebilir düğüme bağlıdır. Gözlem düğümü 3 durumludur (“Yeşil”, “Sarı” ve “Kırmızı”).
- Bakım faaliyetleri, gerçek hayattaki bakım modellerine göre genişletilmiştir. Böylece, iki farklı bakım faaliyeti, “minör” ve “majör” olarak tanımlanmıştır. Bu bağlamda, minör bakım sadece işgücü maliyeti gerektiren küçük bakım faaliyetlerini içerir. Majör bakımlardan çok daha az maliyetlidir; ancak, bileşenin durumunu iyileştirme garantisi vermez. Majör bakım ise doğrudan bileşenin yenisi ile değiştirilmesidir.



Şekil 35. İki zaman dilimi için deneysel faktörlü POMDP modeli

4.5.2 Olasılık Yapısı

- Minör bakım faaliyetleri başarı garantisi vermez. Minör bakım başarılı olursa, bileşen herhangi bir t anında yalnızca bir önceki iyi durumuna geçebilir. Örnek olarak, minör

bakım yapıldıktan sonra “Yıpranmış2” durumundaki bir bileşen, bakım faaliyeti başarılı olursa, “Yıpranmış1” durumuna geçer.

- “Bozulmuş” durumundaki bir bileşen, minör bakım ile daha iyi bir duruma geçemez, “Bozulmuş” durumda kalır. Bir başka deyişle, “Bozulmuş” durumundaki bir bileşen için major bakım esastır.
- Majör bir bakım yapıldığında, tüm bileşenler kesin olarak “Çalışıyor” durumuna geçerler.
- C1 ile C3 ve C2 ile C4 bileşenleri aynı bozulma olasılıklarına sahiptir. C2 ile C4 bileşenleri, C1 ile C3 bileşenlerinden daha yavaş bozulur.
- P1 ve P2 süreçleri olasılıksal kapılarla tanımlanır, bu nedenle, bileşenlerden biri arıza durumunda olsa bile, ilgili süreç düğümü düşük bir olasılıkla çalışmaya devam edebilir. Her iki bileşen de başarısız olduğunda, ilgili süreç de başarısız olur. Fakat, P3 için durum böyle değildir. P1 ve P2’den herhangi biri başarısız durumda ise, P3 başarısız durumda demektir.
- Gözlemlerin doğruluğu olasılıksaldır. Gözlem düğümü sistemin duruşuna daha duyarlıdır. Sistem arızalandığında kırmızı bir sinyal alma olasılığı neredeyse kesindir.
- Deneysel sistemin POMDP modeli için tanımlanan tüm geçiş ve koşullu olasılıklar Ek C’de sunulan tablolarda verilmiştir.

4.5.3 Maliyet Yapısı

- Her bir bileşen için minör bakım faaliyetinin işçilik maliyeti 500 TL olarak alınmıştır. Minör bakım faaliyetlerinde sistem duruşundan kaynaklanan bir bakım maliyeti yoktur.
- Yeşil veya sarı sinyal gözlemlendiğinde, her bir bileşen için majör bakım faaliyetinin toplam maliyeti, ilgili bileşenin yenileme maliyeti, işçilik maliyeti ve sınırlı bir süre için üretim kaybından oluşur. C1, C2, C3 ve C4 için bu maliyetler sırasıyla 2000, 2200, 2400 ve 2600 TL olarak varsayılmıştır.
- Diğer taraftan, kırmızı bir sinyal alındığında, sistem çok yüksek bir olasılıkla “bozulmuş” durumundadır. Bu nedenle, sistemin durması nedeniyle bir duruş maliyeti (DM) oluşur. Bu duruş maliyeti, gerçekleşmemiş üretim taahhütleri, fazla mesai masrafları ve planlanmamış kesinti nedeniyle ortaya çıkan ceza maliyetini içerir. Bu yüzden bu maliyet bu çalışmada bir parametre olarak bırakılmıştır, böylelikle farklı gerçek hayat problemlerine göre çeşitli arıza süresi maliyetleri için duyarlılık analizleri yapılacaktır.

- Alınan gözlem ve yapılan bakım aktivitesine bağlı olarak bakım maliyetleri Tablo 49'da verilmiştir.

Tablo 49. Deneysel faktörlü POMDP modelinin bakım maliyetleri

Eylem	Gözlem		
	Yeşil	Sarı	Kırmızı
Bir şey yapma	0	0	DM
Minör-C1	500	500	500+DM
Minör-C2	500	500	500+DM
Minör-C3	500	500	500+DM
Minör-C4	500	500	500+DM
Majör-C1	2.000	2.000	2.000+DM
Majör-C2	2.200	2.200	2.200+DM
Majör-C3	2.400	2.400	2.400+DM
Majör-C4	2.600	2.600	2.600+DM

4.5.4 Faktörlü POMDP Modelleme

Yukarıda anlatılan çok bileşenli sistem faktörlü POMDP'ler ile modellenecektir. Ardından model, yaklaşık nokta tabanlı POMDP çözücü olan Symbolic Perseus-MATLAB (SPM) kullanılarak çözülecektir. Ayrıca POMDP çözücüsü tarafından elde edilen bakım politikasının performansını karşılaştırmak için önceden tanımlanmış bazı proaktif ve reaktif bakım politikaları da problem üzerinde simüle edilecektir.

Klasik POMDP modelindeki sistem düğümü s dört bileşen ve üç süreç değişkeninden oluşan bir bileşik değişkendir. Klasik temsil kullanılacak olsaydı, her bir eylem durumu için geçiş matrisi 2048×2048 kare matris olacaktı. Çünkü dört bileşenden her birinin dört durumu vardır ve üç sürecin her birinin iki durumu vardır ($4^4 \times 2^3 = 2048$). Öte yandan, modelin faktörlü gösterimi, bu hantal geçiş matrisini faktörlü dört adet 4×4 kare matrise (her biri dört durumlu dört bileşen için), iki adet 16×2 matrise (P1 ve P2 koşullu olasılıkları için) ve son olarak bir adet 4×2 matrisine (P3 koşullu olasılığı için) indirger.

Faktörlü modelde koşullu bağımsızlıktan (conditional independence) yararlanılarak, hantal klasik POMDP durum değişkeni s 'in durum geçiş olasılıkları, Denklem (20)'de gösterildiği gibi faktörlü modeldeki koşullu olasılıklar kullanılarak hesaplanabilir. Bir POMDP'deki durum geçişinin boyutunun faktörleme yoluyla nasıl azaldığını vurgulamak için, Denklem (20)'nin sol ve sağ

taraflarındaki matrislerin boyutları da Denklem (21)'de verilmiştir. X , rassal bir değişken ise, x ve x' , t ve $t + 1$ zamanlarındaki X 'in değerlerini gösteriyor olsun.

$$P(s'|s, a) = P(c1'|c1, a) \cdot P(c2'|c2, a) \cdot P(c3'|c3, a) \cdot P(c4'|c4, a) \cdot P(p1'|c1', c2') \cdot P(p2'|c3', c4') \cdot P(p3'|p1', p2') \quad (20)$$

$$[]_{2048 \times 2048} \leftrightarrow []_{4 \times 4}, []_{4 \times 4}, []_{4 \times 4}, []_{4 \times 4}, []_{16 \times 2}, []_{16 \times 2}, []_{4 \times 2} \quad (21)$$

Verilen bakım modelinde, klasik POMDP eylem değişkeni a da bir başka bileşik değişken olup, faktörlü POMDP'de her biri bir bileşen için, üç durumlu (bir şey yapma, minör bakım, majör bakım) olan dört düğümüne faktörlü olarak ayrılabilir. SPM'deki bakım probleminin faktörlü temsilde her bir bileşenin her bir eylem durumu için geçiş matrisi, bir karar diyagramı ile modellenilebilir ve eylemlerin tanımında çağrılabilir.

Şekil 36'nın solunda "MajörBakımC3" (yalnızca C3'e majör bakım yapılma durumu), sağında ise "MajörBakımC1C3" (C1 ve C3'e birlikte majör bakım yapılma durumu) eylemleri için SPM'de faktörlü geçişin nasıl tanımlandığı gösterilmiştir. Şekilde eylemlerin tanımında kullanılan karar diyagramları şunlardır: Default C_i , C_i için herhangi bir bakım yapılmadığında C_i 'ye geçiş olasılığıdır, Minör C_i , C_i 'ye minör bakım yapıldığında C_i 'ye geçiş olasılığıdır, Majör C_i ise C_i 'ye majör bakım yapıldığında C_i 'ye geçiş olasılığıdır. SAME P_i ise geçişlerden etkilenmeyen P_i 'nin koşullu olasılığıdır. Faktörlü POMDP modelinde her bir karar diyagramı bir kere tanımlanır ve ilgili eylem tanımında çağrılır.

Bakım probleminde, bir zaman diliminde sadece bir bakım eyleminin gerçekleştirilebileceği varsayılmaktadır. Bununla birlikte, eylem seti, duyarlılık analizinde kullanılmak üzere ikili eylem kombinasyonları ile genişletilecektir. Düz gösterimde, her bir ek eylem, 2048x2048lik bir durum geçiş matrisi daha gerektirecek ve bu da girdi dosyasının boyutunun daha da büyümesine ve sistem geçiş hesaplamalarının daha da zorlanmasına neden olacaktır. Diğer yandan, faktörlü modellemede, eylem tanımları modüler yapıldığı için birleşik eylemlerde ihtiyaç duyulan yeni eylemler farklı bir karar diyagramı tanımlanmadan modele rahatlıkla eklenebilmektedir. Ancak, eylem uzayı büyüdüğünde faktörlü modellerin çözümünde gereken sistem geçiş hesapları da zorlaşacak olup dengi olan düz gösterimli POMDP modellerinin zorlandığı kadar olmayacaktır.

action MajörBakımC3	action MajörBakımC1C3
C1 (DefaultC1)	C1 (MajörC1)
C2 (DefaultC2)	C2 (DefaultC2)
C3 (MajörC3)	C3 (MajörC3)
C4 (DefaultC4)	C4 (DefaultC4)
P1 (SAMEP1)	P1 (SAMEP1)
P2 (SAMEP2)	P2 (SAMEP2)
P3 (SAMEP3)	P3 (SAMEP3)
observe ...	observe ...
cost ...	cost ...
endaction	endaction

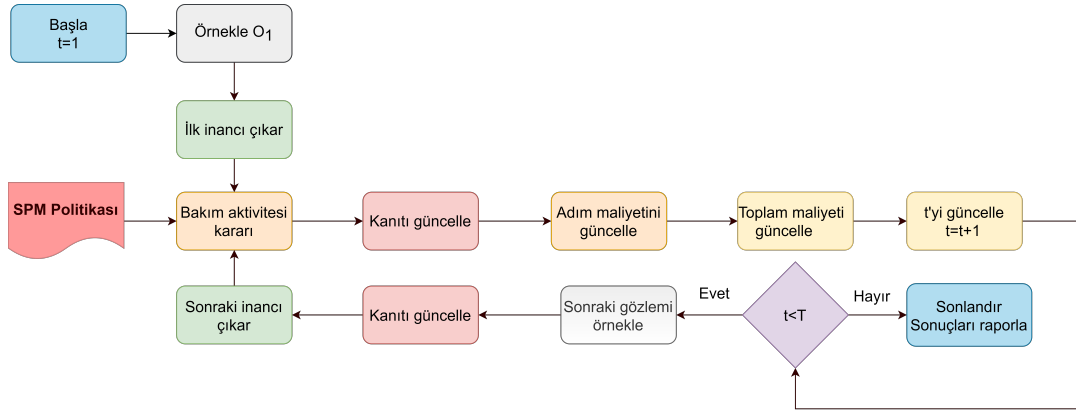
Şekil 36. SPM'de eylemler ve kombine eylemler için kod örnekleri

4.5.5 Bakım Politika Simülasyonu

Ele alınan çok-bileşenli bakım problemi, halihazırda mevcut olan faktörlü yapıdan yararlanılarak faktörlü bir POMDP olarak modellenmiş ve yaklaşık bir faktörlü POMDP çözücüsü olan MATLAB versiyonlu Symbolic Perseus (SPM) aracılığıyla çözdürülmüştür. Politika üretmek ve ayrıca simülasyon için SPM kullanılmıştır. SPM, cebirsel karar diyagramlarını kullanarak değer fonksiyonlarının ve inançların faktörlü temsillerini uygulayan yaklaşık bir nokta tabanlı POMDP çözücüsüdür. Bir politika elde edildikten sonra, bu politikanın performansını değerlendirmek ve farklı senaryolar altında duyarlılık analizleri yapmak için simülatörde yürütülmüştür. SPM içindeki simülatörün kodunda bazı değişiklikler ve eklemeler yaparak raporlamada istenilen simülasyon çıktılarının elde edilmesi sağlanmıştır. Bakım politikası simülasyonunun akışı Şekil 37'de verilmiştir. Bu bölümdeki tüm deneysel analizler için, politikalar 100 günlük karar ufku boyunca simüle edilmiş ve her politika için 50 simülasyon tekrarı gerçekleştirilmiştir. İndirim faktörü, bire yakın olacak şekilde 0,999 olarak belirlenmiştir.

4.5.6 Önceden Tanımlanmış Politikalar

POMDP çözücü tarafından oluşturulan politikanın performansını analiz etmek için, SPM sonuçları önceden tanımlanmış bazı düzeltici ve proaktif bakım stratejileri ile karşılaştırılır. Önceden tanımlanmış politikaların tasarımında, bakımın zamanı, bakım yapılacak bileşen ve bakım eylemi gibi önemli olan üç önemli kriter dikkate alınır. Bakım zamanı kararı reaktif (Reak) veya proaktif (Pro) politikalarla verilir.



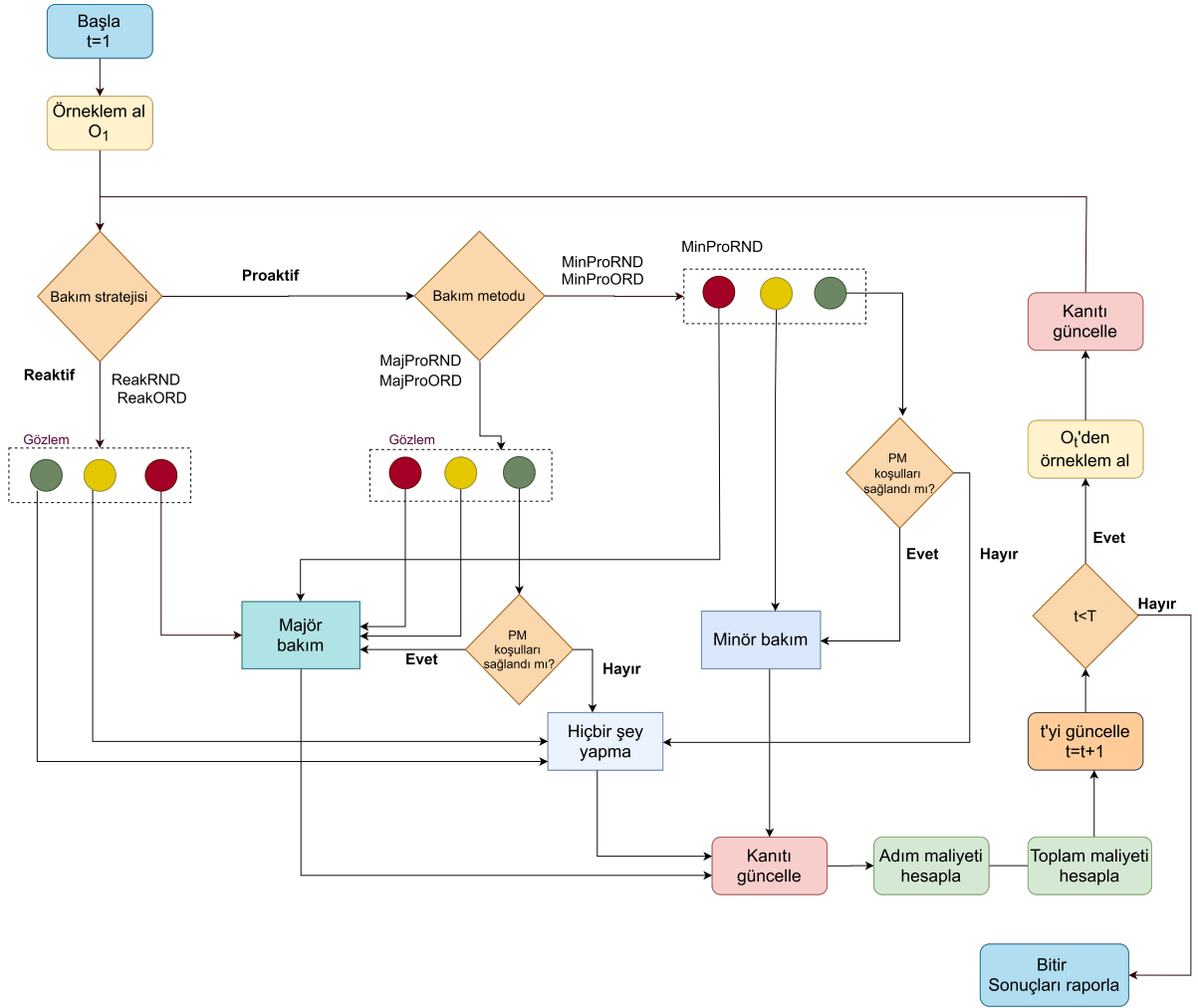
Şekil 37. SPM bakım politika simülasyonu

Düzeltilici bakımda, sadece kırmızı sinyal alındığında bakım yapılır. Proaktif politikalarda, sarı bir sinyal her zaman ilgili politikaya göre minör veya majör bakım başlatır. Diğer taraftan, yeşil bir sinyal gözlemlendiğinde, önceden tanımlanmış ardışık yeşil sinyallerin sayısına bağlı olarak ilgili proaktif politikasına göre minör veya majör bakım kararı verilir.

Bir bakım süresine karar verildiğinde, bileşen seçimi rastgele (RND) veya sıralı (ORD) bir yöntemle yapılır. Adlarından da anlaşılacağı gibi, rastgele yöntemde, bileşenler rastgele seçilirken, sıralı yöntemde bileşenler bileşen numaraları sırasıyla dögüsel olarak seçilirler. Önceden tanımlanmış tüm politikalarda, kırmızı bir sinyal alındığında, seçilen bileşende majör bakım gerçekleştirilir. Bileşen seçimi yapıldıktan sonra proaktif bir bakım zamanında (sarı veya yeşil sinyal alındığında), majör (Maj) veya minör (Min) aktiviteyi seçecek bakım türüne karar verilmesi gerekir. Önceden tanımlanmış tüm bakım politikalarının genel akışı Şekil 38’de gösterilmiştir. Bu politikaların isimlendirilmesine bir örnek vermek gerekirse “MinProORD” politikasında yeşil veya sarı bir sinyal alındığında, bakım yapılacak bileşen sırayla seçilir ve seçilen bileşene minör bakım yapılır, kırmızı sinyalde ise yine sırayla seçilmiş bileşene mutlaka majör bakım yapılır.

4.5.7 Duyarlılık Analizleri için Deney Tasarımı

Maliyet ve olasılık parametreleriyle çeşitli senaryolar oluşturulmuş ve analiz edilmiştir. Senaryolarda minör bakımların başarı olasılığı (p) sırayla 0,3, 0,5 ve 0,7 olarak alınmıştır. Duruş maliyeti (DM), 500-100.000 aralığında farklı seviyelerde denenmiştir. Politika ayrıca, eylem uzayı sınırlandırılarak ve genişletilerek çeşitli DM değerleri ve minör eylemlerin başarı oranları altında



Şekil 38. Önceden tanımlanmış politikaların akışı

analiz edilmiştir. Eylem uzayındaki bakım eylemleri üç seviyede analiz edilmiştir. Baz senaryoda, eylem uzayı minör ve majör eylemleri kapsar. Sınırlandırılmış senaryoda, eylem uzayı yalnızca majör eylemlerle sınırlandırılırken, genişletilmiş senaryoda iki majör eylemin kombinasyonları da eylem uzayına dahil edilir. SPM politika simülasyonu deneysel tasarım Tablo 50'de verilmiştir.

Bu deneylere ek olarak, 1.000, 7.000 ve 70.000 DM değerlerinde önceden tanımlanmış proaktif ve düzeltici bakım politikalarının performansları değerlendirilip POMDP çözücüsü aracılığıyla oluşturulan politikaların performanslarıyla karşılaştırılmıştır. Kurgulanan modelde, bileşenler neredeyse aynı yaşlanma olasılıklarına sahiptir. Analizlerin tüm gerçek hayat sistemlerini kapsayabilmesi için, farklı yaşlanma davranışları elde etmek amacı ile bileşenlerin bozulma

Tablo 50. SPM için deneysel tasarım

Deney	p			DM		Eylem Uzaı			Lokasyon
	0,3	0,5	0,7	500-6.000	10.000-100.000	Majörler	Majörler, Minörler	Majörler, Minörler, Kombinasyonlar	
1	*			*			*		Bölüm 4.5.8
2		*		*			*		
3			*	*			*		
4	*				*		*		Bölüm 4.5.9
5		*			*		*		
6			*		*		*		
7				*	*	*			Bölüm 4.5.10
8	*			*				*	Bölüm 4.5.10
9			*	*				*	
10	*				*			*	
11			*		*			*	

olasılıkları da farklılaştırılmıştır. Önceden tanımlanmış stratejiler için deneysel tasarım Tablo 51’de verilmiştir. Tabloda, f , proaktif bakım için bir kontrol noktası olup ardışık gözlemlenen yeşil sinyal sayısı cinsinden proaktif bakımın aralığını gösterir. Örneğin, $f=3$ olduğunda, ardışık üç yeşil sinyal gözlemlendiğinde, önceden tanımlanmış politikalardaki proaktif bakım koşulunun karşılandığı anlamına gelir.

Tablo 51. Önceden tanımlanmış politikalar için deneysel tasarım

Deney	Yaşlanma Davranışı		p	DM			f			Lokasyon
	Benzer	Benzer Olmayan		0,7	1.000	7.000	70.000	1-3	1-9	
1	*		*	*					*	Bölüm 4.5.12
2	*		*		*			*		
3	*		*			*		*		
4		*	*	*					*	Bölüm 4.5.13
5		*	*		*			*		
6		*	*			*		*		

4.5.8 Minör Bakım Olasılığına Duyarlılık

Minör bakımın başarı olasılığı (p) sırasıyla 0,3, 0,5 ve 0,7 olarak alınmış ve bunların duruş maliyetine duyarlılık analizlerinin sonuçları sırasıyla Tablo 52, 53 ve 54’te verilmiştir. Tablolarda, TMaliyet ve TKırmızı, verilen ufkun toplam maliyetini ve o ufukta gözlemlenen toplam kırmızı sinyallerin sayısını gösterir. TBakım, minör ve majör bakımların toplamıdır. Bu ölçümlerin ortalamaları (Ort) ve standart sapmaları (Ss) tablolarda verilmiştir. Ayrıca, minör ve majör bakımın bileşenler arasındaki dağılımı da tablolarda verilmiştir.

Tablo 52. Farklı DM değerlerinde duyarlılık analizi, $p=0,3$

Duruş Maliyeti	TMaliyet		TKırmızı		TBakım		Minör Bakım					Majör Bakım				
	Ort	Ss	Ort	Ss	Ort	Ss	C1	C2	C3	C4	Toplam	C1	C2	C3	C4	Toplam
500	41.921	3.514	88,46	7,13	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1.000	71.241	14.211	27,98	5,12	20,94	4,43	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	7,54	4,22	5,96	3,22	20,94
2.000	102.580	17.822	20,22	4,59	59,28	4,79	17,72	5,82	12,24	1,96	37,74	6,86	5,14	5,68	3,86	21,54
3.000	120.555	18.333	15,82	3,86	91,36	3,03	26,48	4,36	40,60	0,86	72,30	5,98	5,12	3,50	4,46	19,06
4.000	138.562	22.712	15,52	4,11	100,00	0,00	44,74	0,00	31,96	4,64	81,34	4,22	4,90	5,34	4,20	18,66
5.000	153.191	24.269	16,00	3,75	100,00	0,00	3,68	0,00	72,00	6,00	81,68	8,52	4,86	1,78	3,16	18,32
6.000	162.484	30.703	14,86	4,05	100,00	0,00	17,44	13,32	47,68	3,40	81,84	7,26	3,94	2,96	4,00	18,16

Tablo 53. Farklı DM değerlerinde duyarlılık analizi, $p=0,5$

Duruş Maliyeti	TMaliyet		TKırmızı		TBakım		Minör Bakım					Majör Bakım				
	Ort	Ss	Ort	Ss	Ort	Ss	C1	C2	C3	C4	Toplam	C1	C2	C3	C4	Toplam
500	41.921	3.514	88,46	7,12	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1.000	70.702	14.207	31,92	5,83	36,06	5,98	0,00	5,22	7,62	8,84	21,68	6,56	2,60	3,72	1,50	14,38
2.000	95.141	16.052	18,02	4,39	70,64	6,38	3,66	8,58	27,92	13,60	53,76	7,86	4,02	2,62	2,38	16,88
3.000	115.825	18.815	15,24	4,23	100,00	0,00	1,78	0,00	69,84	12,68	84,30	8,32	4,48	1,10	1,80	15,70
4.000	130.648	22.798	14,74	4,20	100,00	0,00	26,82	0,00	37,62	19,78	84,22	2,50	7,08	2,48	3,72	15,78
5.000	146.798	31.319	14,74	4,84	100,00	0,00	43,54	2,66	32,68	4,20	83,08	2,64	6,54	3,44	4,30	16,92
6.000	158.446	35.095	14,88	4,60	100,00	0,00	0,14	4,74	45,34	33,38	83,60	8,80	4,04	1,80	1,76	16,40

Tablo 54. Farklı DM değerlerinde duyarlılık analizi, $p=0,7$

Duruş Maliyeti	TMaliyet		TKırmızı		TBakım		Minör Bakım					Majör Bakım				
	Ort	Ss	Ort	Ss	Ort	Ss	C1	C2	C3	C4	Toplam	C1	C2	C3	C4	Toplam
500	42.130	3.464	87,90	7,51	0,98	1,27	0,42	0,00	0,56	0,00	0,98	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1.000	67.001	16.155	29,60	6,91	37,86	7,30	0,00	8,28	5,16	11,44	24,88	6,16	2,10	3,64	1,08	12,98
2.000	90.209	16.764	18,78	4,55	64,02	6,10	0,00	7,04	34,08	7,68	48,80	8,32	3,16	1,64	2,10	15,22
3.000	110.011	17.632	14,22	3,95	99,00	0,00	1,36	1,66	54,80	26,94	84,76	7,34	4,30	1,48	1,12	14,24
4.000	121.242	24.606	13,24	4,46	100,00	0,00	41,18	19,22	15,26	10,88	86,54	2,88	2,64	4,60	3,34	13,46
5.000	138.684	28.224	14,28	4,39	100,00	0,00	2,86	38,22	23,22	21,16	85,46	7,94	2,26	2,32	2,02	14,54
6.000	148.062	27.655	13,20	3,66	100,00	0,00	51,54	5,68	27,46	1,36	86,04	1,64	3,88	1,80	6,64	13,96

Üç başarı olasılığı değerinin tamamında DM arttıkça ortalama toplam maliyet beklenildiği gibi artar. Ayrıca, DM arttıkça, ortalama toplam kırmızı sinyal sayısı azalır ve ortalama toplam bakım sayısı artar. Başka bir deyişle, DM arttıkça, politika kırmızı bir sinyal beklemeden daha proaktif davranma eğilimindedir. Başarı olasılığının ilk iki seviyesi için ($p=0,3$ ve $p=0,5$), 500 duruş maliyeti sistem için oldukça küçüktür, bu nedenle sistem herhangi bir bakım faaliyeti gerçekleştirmeden sürekli olarak durur. Ayrıca, minör eylemin başarı olasılığı oldukça küçük olduğunda, yani $p=0,3$ olduğunda, 1.000 duruş maliyetinde bile politika minör bakım yapmaz. Her üç modelde de, DM arttıkça sistem daha proaktiftir, bu nedenle daha çok minör eylem gerçekleştirilir. Ayrıca, minör eylemlerin başarı olasılığı arttıkça, aynı DM değeri için toplam maliyet azalır, çünkü politikada gerçekleştirilen minör (majör) bakım sayısı nispeten artar (azalır).

P3 süreci "VEYA" olasılık kapısına sahip olduğu için, tüm bileşenlerin çalışmasını sağlamak gerekir. Her üç minör bakım başarı olasılığı senaryosunda, bileşenler arasındaki majör bakım

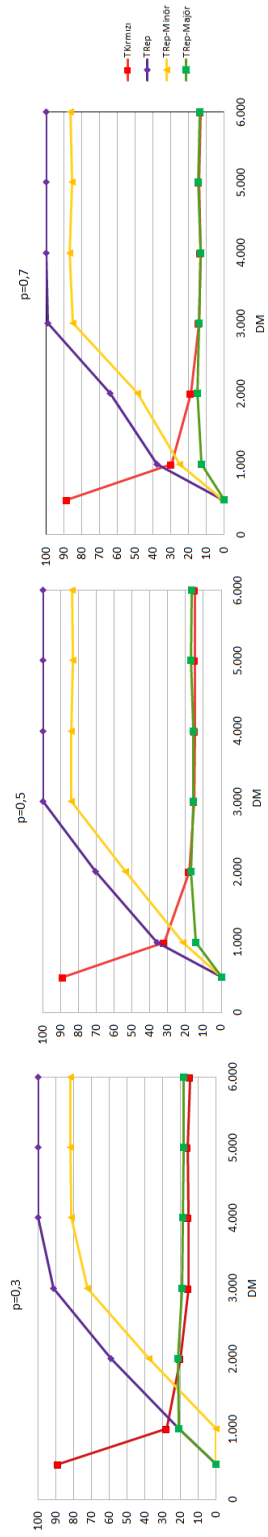
dağılımında dikkate değer bir dengesizlik olduğunda orada daha az pay sahibi olanlar minör bakım dağılımında önemli ölçüde daha fazla paya sahiptir. Bu bağlamda, C3'ün genel olarak minör (majör) bakımda daha çok (daha az) tercih edildiği görülmektedir.

4.5.9 Duruş Maliyetine Duyarlılık

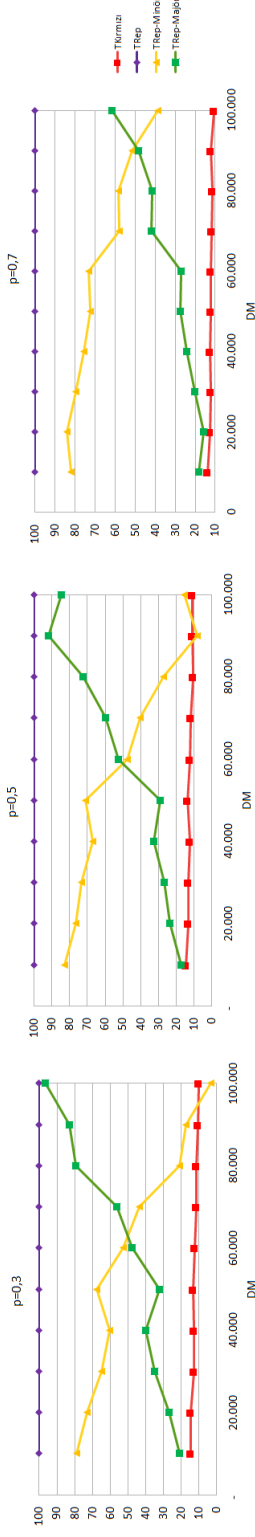
Farklı DM değerleri için ortalama toplam kırmızı sinyal sayısı ile ortalama toplam minör ve majör bakım sayısı Şekil 39'da gösterilmektedir. 3.000 duruş maliyetinden sonra, tüm politika göstergeleri (TKırmızı, TBakım, TBakım-Minör, TBakım-Majör) neredeyse sabit bir duruma ulaşır. Politika, DM 3.000 ile 6.000 arasında olduğunda tüm dönemlerde minör veya majör bakım yapmayı tercih eder, ancak minör bakımlar majör bakımlardan önemli ölçüde daha fazladır. Politikanın üç başarı olasılığı senaryosunda da benzer şekilde davrandığı sonucuna varılabilir. Model, majör bakım gibi daha etkili eylemler gerçekleştirerek gözlemlenen toplam kırmızı sinyal sayısını azaltma fırsatına sahip olsa da, politika, modelin maliyet yapısı nedeniyle bunu tercih etmemektedir.

Politikayı daha fazla majör bakım yapmaya teşvik etmek için sistemin duruş maliyeti çok daha büyük değerlere, [10.000; 100.000] aralığına, artırılmıştır. Minör eylemlerin üç başarı olasılığı düzeyi için politika sonuçları Şekil 40'da grafiksel olarak gösterilmiştir.

Şekilden görülebileceği gibi, DM arttıkça, beklenildiği gibi majör bakım eylemlerinin sayısı artar ve alınan kırmızı sinyallerin sayısı düşer. Her başarı olasılığı değeri için, DM arttıkça, Şekil 39'daki ilgili davranışa kıyasla politika daha çok majör bakım eylemlerini teşvik etmektedir. Bu, politikanın ekstrem DM değerlerinde beklenen şekilde davrandığını gösterir. Minör bakım işlemlerinin başarı şansı arttıkça, özellikle Şekil 40'da görüldüğü gibi, politikanın minör bakım eğilimindeki yavaşlama oranı düşer. $p=0,7$ iken minör ve majör bakımların toplam bakımda eşit sayıda (her biri 50) olduğu DM değeri yaklaşık 90.000 iken bu değer $p=0,3$ ve $p=0,5$ 'te dengenin sağlandığı DM değerlerinden daha büyüktür. Politika, $p=0,3$ ve $p=0,5$ 'te çok yüksek DM'de kırmızı bir sinyal alınmasını beklemeden proaktif olarak minör yerine majör bakım yapmayı tercih eder. Çok büyük DC değerlerinde, $p=0,7$ 'deki politika davranışı $p=0,3$ ve $p=0,5$ 'teki politika davranışlarından Şekil 40'da, Şekil 39'a kıyasla, farkedilir şekilde ayrılmaktadır.



Şekil 39. DM 500-6.000 aralığındayken SPM politikasının davranışı



Şekil 40. DM 10.000-100.000 aralığındayken SPM politikasının davranışı

4.5.10 Eylem Uzayına Duyarlılık

Baz modelde her bileşen için 3 eylem vardır, bunlar *bir şey yapma*, *minör bakım*, *majör bakımdır*. Bu bölümde, farklı duruş maliyetleri altında duyarlılık analizleri gerçekleştirmek için eylem uzayıyla ilgili iki tane daha farklı senaryo ele alınmıştır. Bunlardan ilki, sadece majör bakımları içeren sınırlandırılmış eylem uzayıdır. İkincisi ise, iki ayrı majör bakımı birlikte yapmayı sağlayan kombinasyon bakımları içeren genişletilmiş eylem uzayıdır.

Sınırlandırılmış Eylem Uzayı

Minör bakımda p başarı olasılığı olan bir bileşen yalnızca “Yıpranmış1” veya “Yıpranmış2” durumdaysa, durumunu bir önceki iyi duruma çıkarabilir. Bununla birlikte, minör bakım her bileşen için 500 TL işçilik maliyetini içerir ve üretim kaybına yol açmaz. Minör eylemlerin bakım politikası üzerindeki etkilerini değerlendirmek için, bu bölümde minör eylemler modelden çıkarılmıştır. Duyarlılık analizlerinin sonuçları Tablo 55'te verilmektedir.

Tablo 55. Sınırlandırılmış eylem uzayı için farklı DM değerleri altında duyarlılık analizi

Duruş Maliyeti	TMaliyet		TKırmızı		TBakım		Bileşenlerin Majör Bakım Sayıları				
	Ort	Ss	Ort	Ss	Ort	Ss	C1	C2	C3	C4	Toplam
500	42.467	3.592	89,60	7,30	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1.000	74.304	12.149	26,18	4,08	23,24	3,90	8,78	4,48	6,56	3,42	23,24
3.000	119.750	19.310	24,28	3,96	23,88	3,84	9,52	4,56	6,66	3,14	23,88
5.000	168.453	27.909	24,24	3,99	25,18	4,11	10,34	3,96	7,76	3,12	25,18
7.000	204.448	34.256	21,90	3,94	27,74	4,25	10,96	4,38	9,48	2,92	27,74
10.000	261.555	48.456	19,88	4,25	34,40	4,07	15,04	4,92	10,88	3,56	34,40
30.000	537.587	113.802	12,34	3,91	88,06	1,63	39,08	23,44	8,22	17,32	88,06
50.000	734.577	196.890	10,94	4,13	100,00	0,00	40,30	19,46	15,68	24,56	100,00
70.000	953.894	256.252	11,14	3,84	100,00	0,00	41,22	23,90	11,36	23,52	100,00
100.000	1.194.318	402.139	10,30	4,24	100,00	0,00	36,78	24,62	14,54	24,06	100,00

Genişletilmiş Eylem Uzayı

Daha ileri bir çalışma olarak, bir kerede yalnızca bir bileşenin değiştirilmesi varsayımı genişletilmiştir; aynı anda iki bileşenin birlikte yenilenmesi eylemleri eklenmiştir. Böylece, eylem uzayı yeni eklenen eylemlerle; “C1 ve C2’yi yenile”, “C1 ve C3’ü yenile”, “C1 ve C4’ü yenile”, “C2 ve C3’ü yenile”, “C2 ve C4’ü yenile”, “C3 ve C4’ü yenile”; 15 eyleme genişletilmiştir. Kırmızı bir sinyal alındığında kombinasyon majör eylemlerinin maliyeti hesaplanırken ilgili bileşenlerin yenileme maliyetleri, işçilik maliyetleri ve bir adet kesinti maliyeti dahil edilir. Hesaplamasında bir adet kesinti maliyeti olmasından dolayı kombinasyon eylemlerinin bakım maliyeti, kombinasyondaki ilgili eylemlerin tek tek maliyet toplamlarından daha avantajlıdır. Duyarlılık analizlerinin sonuçları

p=0,3 ve p=0,7 için Tablo 56 ve Tablo 57’de verilmektedir.

Tablo 56. Genişletilmiş eylem uzayı için farklı DM değerleri altında duyarlılık analizi, p=0,3

Duruş Maliyeti	TMaliyet		TKırmızı		TBakım		Bakım		
	Ort	Ss	Ort	Ss	Ort	Ss	Minör	Majör	Kombinasyon
500	41.921	3.514	88,46	7,13	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1.000	70.600	13.674	30,72	5,15	10,76	2,67	0,00	2,30	8,46
3.000	111.844	18.427	15,60	2,57	15,60	2,57	0,00	0,00	15,60
5.000	139.660	26.826	12,68	3,22	67,36	4,79	54,68	0,00	12,68
7.000	162.971	28.098	11,34	2,80	100,00	0,00	88,46	1,38	10,16
10.000	195.719	39.248	11,26	2,98	100,00	0,00	88,62	0,66	10,72
30.000	386.263	85.391	9,06	2,71	100,00	0,00	78,80	0,04	21,16
50.000	534.547	110.803	7,50	2,22	100,00	0,00	65,54	0,00	34,46
70.000	672.738	173.129	6,38	2,59	100,00	0,00	48,40	0,00	51,60
100.000	806.619	201.054	4q92	2q12	100,00	0,00	24,18	0,00	75,82

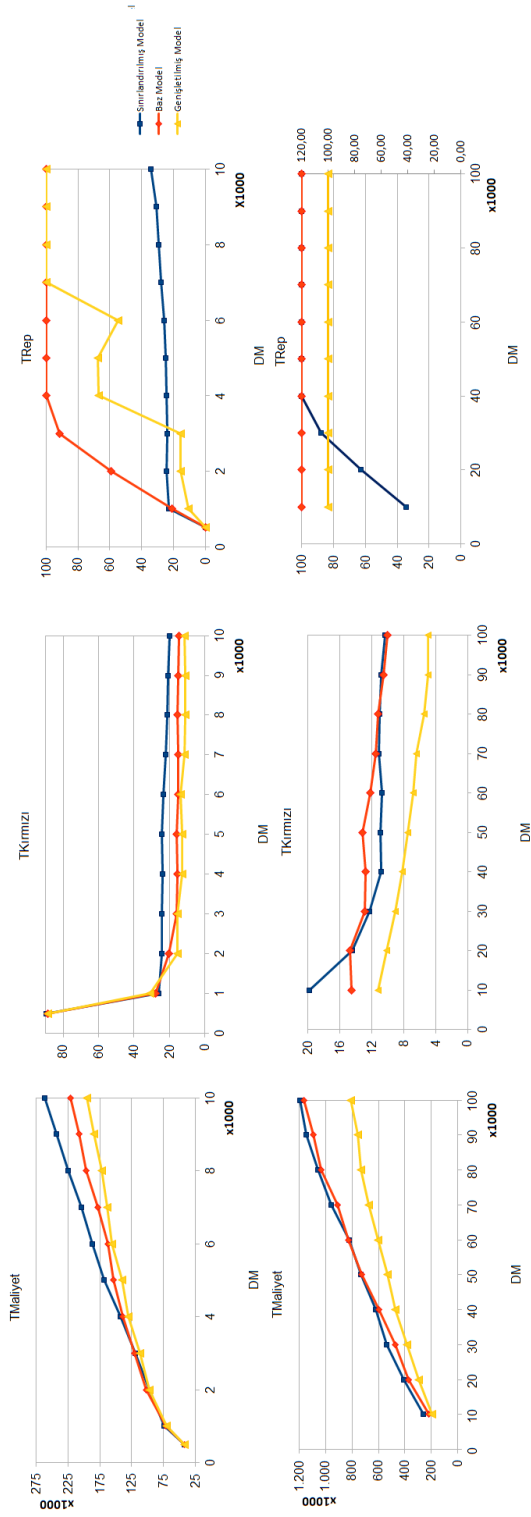
Tablo 57. Genişletilmiş eylem uzayı için farklı DM değerleri altında duyarlılık analizi, p=0.7

Duruş Maliyeti	TMaliyet		TKırmızı		TBakım		Bakım		
	Ort	Ss	Ort	Ss	Ort	Ss	Minör	Majör	Kombinasyon
500	42.180	3.463	87,90	7,51	1,08	1,34	1,08	0,00	0,00
1.000	71.812	15.842	26,36	5,13	31,18	5,00	22,88	0,00	8,30
3.000	108.777	23.414	12,56	4,13	81,00	2,97	71,56	0,58	8,86
5.000	128.452	24.932	9,66	3,00	97,98	1,04	88,32	0,24	9,42
7.000	159.406	30.041	10,72	2,88	100,00	0,00	17,74	0,16	10,56
10.000	175.261	32.466	9,66	2,45	100,00	0,00	90,34	0,22	9,44
30.000	351.958	78.888	9,24	2,41	100,00	0,00	89,14	0,24	10,62
50.000	499.719	121.996	7,38	2,42	100,00	0,00	72,78	0,00	27,22
70.000	652.081	172.547	6,62	2,54	100,00	0,00	56,66	0,00	43,34
100.000	813.462	223.462	5,04	2,36	100,00	0,00	24,90	0,00	75,10

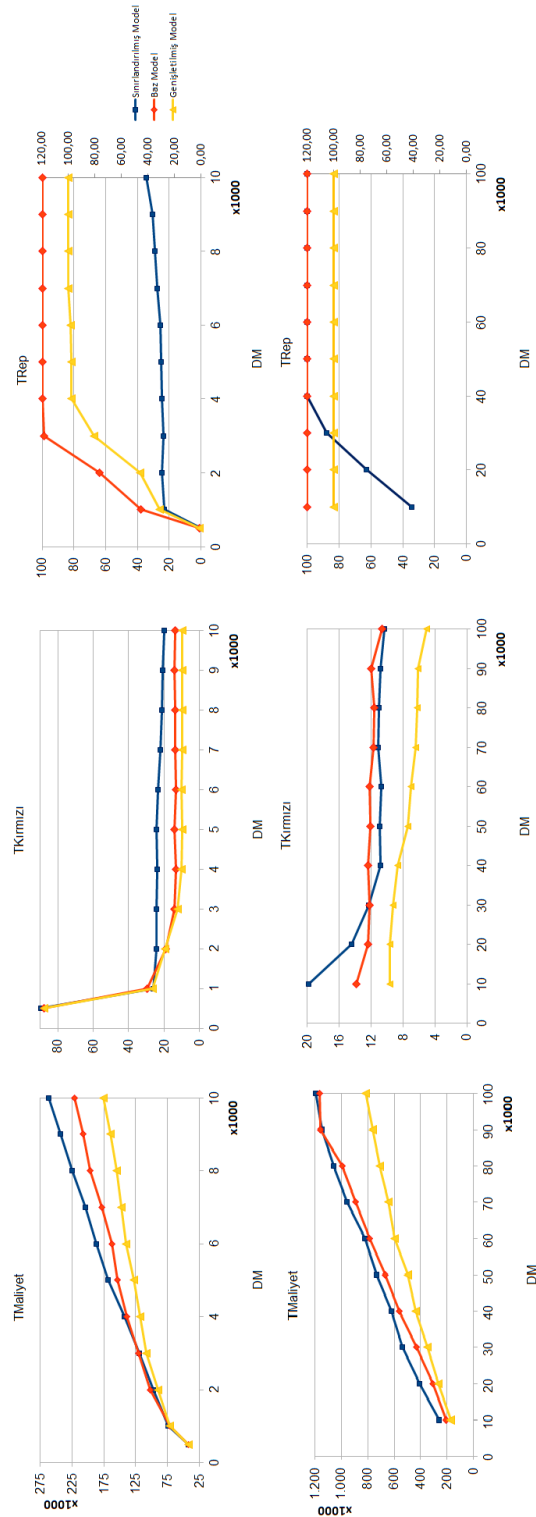
Eylem Uzayı Senaryolarının Karşılaştırılması

Artan DM değerleri ile ([500; 10.000] ve [10.000; 100.000] aralığında) iki başarı olasılığı (p=0,3 ve p=0,7) için eylem uzayı senaryoları (sınırlandırılmış, baz, genişletilmiş), ayrı ayrı TMaliyet, TKırmızı ve TBakım detayında Şekil 41 ve Şekil 42’de verilmiştir.

Her iki başarı olasılığı senaryosunda da, genişletilmiş modelin TMaliyet değeri, politikada proaktif bakımın başladığı 3.000 DM değerinden sonra en düşüktür. DM adım adım arttıkça, genişletilmiş modelin kombinasyon eylemleri gerçekleştirme alternatifine sahip olması nedeniyle



Şekil 41. DM 500-10.000 ve 10.000-100.000 aralığında iken eylem uzayı senaryoları, p=0,3



Şekil 42. DM 500-10.000 ve 10.000-100.000 aralığında iken eylem uzayı senaryoları, p=0,7

TMaliyet'i azaltmadaki başarısı daha açık görülebilir. Ayrıca, baz model, minör eylemleri gerçekleştirme alternatifine sahip olması nedeniyle sınırlandırılmış modelden daha başarılıdır. 10.000-100.000 aralığındaki ekstrem DM değerleri için, özellikle DM=40.000'den sonra baz modelin TMaliyet değeri sınırlandırılmış modelinkine yaklaşmaktadır. Bunun nedeni, bu ekstrem DM değerlerinde, minör bakımların toplam maliyeti düşürmeye yardımcı olmaması sebebi ile, bakımların majör bakım olarak tercih edilmesidir. Bu nedenle, $p=0,7$ için, minör bakım kullanımının, 4.000-40.000 aralığındaki DM değerlerinde avantajlı olduğu söylenebilir.

Baz ve genişletilmiş modelin TKırmızı değerleri, DM=20.000'e kadar sınırlandırılmış modelin TKırmızı değerlerinden daha düşüktür. Bu değerden sonra, baz model daha az sayıda kırmızı gözlemlerle sonuçlanmaz, ancak yine de maliyetini sınırlandırılmış modelin maliyetine en fazla eşit tutmayı başarır. Yani, baz model daha fazla TKırmızı ile sonuçlanabilse de, toplam maliyetini düşürmede hala etkilidir. TBakım değerine göre $p=0,3$ ve $p=0,7$ senaryoları arasındaki en bariz fark, baz ve genişletilmiş modellerin $p=0,7$ iken maksimum bakım sayısına (TBakım=100), minör bakıma daha fazla imkan verdikleri için, daha hızlı ulaşmalarıdır.

4.5.11 Önceden Tanımlanmış Politikalarla Karşılaştırmalar

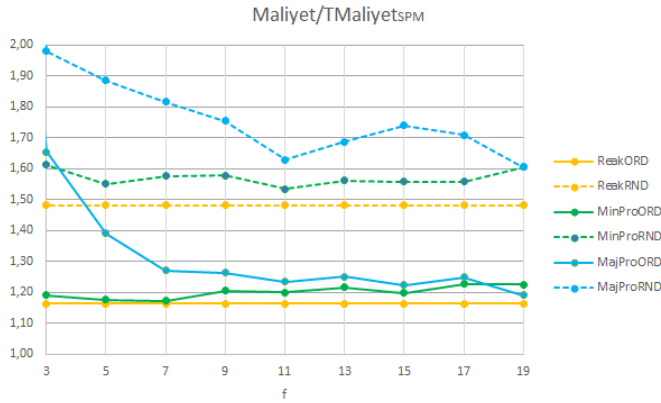
Bu bölümde, faktörlü POMDP çözücüsü SPM tarafından oluşturulan politikaların performansları, detayları Bölüm 4.5.6'da açıklanmış olan önceden tanımlanmış politikalarla karşılaştırılmıştır. Karşılaştırmalar, bileşenlerin bozulma davranışına göre iki ana başlık altında yapılmıştır. Bölüm 4.5.12'te sistem, bileşenlerin benzer olasılıklarla bozulduğu, önceki duyarlılık analizlerinde kullanılan yaşlanma olasılıklarıyla, durumla ele alınmıştır. Bileşen C1 ve C3, 0,97 "Çalışıyor" geçiş olasılığına sahipken, C2 ve C4 bileşenleri, 0,95 "Çalışıyor" geçiş olasılığı ile biraz daha hızlı bozulur. Analizlerin farklı olasılıklarda yaşanan bileşenlere sahip sistemler için de geçerli olması için, "Çalışıyor" geçiş olasılıkları, C1, C2, C3 ve C4 için sırasıyla 0,99, 0,96, 0,93 ve 0,90 yapılarak bileşenlerin yaşlanması farklılaştırılmıştır.

Bölüm 4.5.8'deki duyarlılık analizinde, minör eylemlerin eylem uzayına dahil edilmesi ile politikaların $p=0,7$ durumunda daha fazla minör eylem yapmaya eğilimli olduğu gözlemlenmiştir. Bu nedenle, bu bölümde tüm karşılaştırmalar $p=0,7$ başarı olasılığı altında yapılmıştır. Önceki sonuçlara göre, düzeltici, minör proaktif ve majör proaktif stratejilerinin her birini temsil etmek üzere üç farklı duruş maliyeti değerine karar verilmiştir. En küçük DM değeri, Tablo 54'ten elde edilen sonuca göre SPM politikasının düzeltici eylemler yapmaya başladığı nokta olan 1.000'e ayarlanmıştır. Öte yandan, her periyotta bakım (hem minör hem de majör) yapıldığı için yüksek

değer olarak da 70.000 seçilmiştir. Ayrıca, bir ara değer olarak 7.000 alınmıştır.

4.5.12 Benzer Yaşlanma Davranışları Altındaki Karşılaştırmalar

Duruş maliyeti 1.000 TL iken Bileşenlerin neredeyse benzer bozulma olasılıkları olduğu ilk senaryoda, DM=1.000 iken politikaların toplam bakım maliyetlerinin SPM politikasının toplam maliyetine oranı ile ilgili davranışları, artan bakım aralıklarında Şekil 43'te verilmiştir.



Tablo 58. Benzer yaşlanmalarda DM=1.000 için sonuçlar

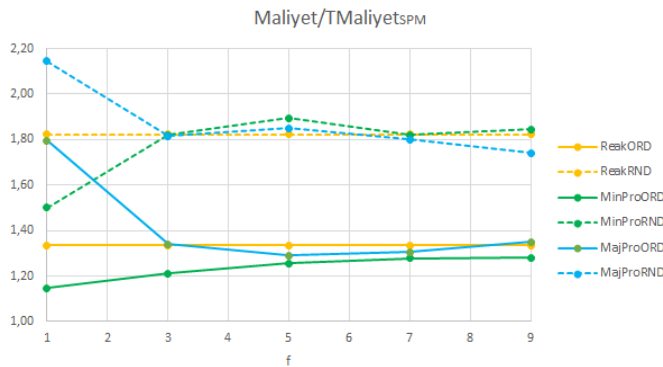
Strateji	f	TMaliyet	GH Grup
SPM	-	67.001	C
ReakORD	-	77.907	B
MinProORD	7	78.498	B
MajProORD	19	79.791	B
ReakRND	-	99.212	A
MinProRND	1	101.276	A
MajProRND	19	107.587	A

Şekil 43. Benzer yaşlanmalarda DM=1.000 için bakım politikaları

Bu kadar küçük bir DM değerinde, SPM politikasından anlaşılacağı üzere bakımın önemli ölçüde gerekli olmadığı açıktır. Ayrıca, proaktif politikaların proaktif bakım aralığı arttıkça düzeltici muadillerine yaklaşması nedeniyle, çalışmanın bu bölümündeki maksimum aralığın, f , yüksek bir değere ayarlanmasına karar verilmiştir. Böylece, f değeri [3;19] aralığında alınmıştır. İstatistiksel karşılaştırma için sabit varyans varsayımı sağlanmadığından dolayı Games-Howell testi uygulanmıştır. Her bir yöntemin en iyi sonucu veren f değeri istatistiksel test için seçilmiştir. Gruplama sonuçları Tablo 58'de verilmiştir. Aynı harf, toplam bakım maliyeti açısından aralarında istatistiksel fark olmayan olan politikaları göstermektedir. Önceden tanımlanmış stratejilerle karşılaştırıldığında, SPM politikası diğerlerine göre önemli ölçüde daha az bakım maliyeti sağlar. RND yönteminin her biri, beklendiği gibi, ilgili ORD yönteminden önemli ölçüde daha kötü performans gösterir. Bakım kararlarında doğru zamanda bakımı yapılacak doğru bileşenin seçilmesi çok önemli olduğundan, bileşen seçiminde rastgele yöntemler başarılı olmaz. Bunun nedeni, iyi durumda olan bir bileşenin arka arkaya bakımının yapılabilmesi ve kötü durumda olan bir bileşenin uzun süre bakımının yapılmaması olasılığıdır. ORD yöntemini kullanan stratejiler

arasında istatistiksel bir fark olmamasına rağmen, ReakORD politikasının performansı SPM'nin performansına en yakın olanıdır. Bu davranış çok düşük DM değeri ile açıklanabilir çünkü DM=1.000'de, SPM politikası çok az proaktif bakım yapar ve genellikle düzeltici bir davranış gösterir.

Politikaların performansları DM=7.000 için toplam bakım maliyeti açısından incelenmiş ve SPM'e göre maliyet oranları Şekil 44'te gösterilmiştir. [1;9] aralığında farklı f değerleri ile analizler yapılmıştır. En iyi f değeriyle önceden tanımlanmış politikaların Games-Howel sonuçları Tablo 59'da sunulmuştur. Sonuçlara göre, SPM politikası diğer politikalara kıyasla minimum maliyeti ortaya koymaktadır. Ancak, SPM ve MinProORD ($f=1$) yöntemlerinin performansları önemli ölçüde farklı değildir. Bunun nedeni, hem SPM hem de MinProORD ($f=1$) politikalarının, sistemin kırmızı sinyali almadan çalışmasını sağlamak için minör proaktif bakım yapmayı tercih etmeleridir. Sonuçlara göre, ORD yöntemleri RND yöntemlerinden daha iyi sonuç vermişlerdir. Bunun nedeni, bileşenlerin benzer yaşlanma davranışı ve benzer bileşen değiştirme maliyetlerinden kaynaklanır, bileşenlerin bir sırayla seçilmesi daha başarılı sonuçlar sağlar. Farklı yaşlanma davranışı ve maliyetleri olan sistemlerde, ORD yöntemleri o kadar başarılı olmayabilir. DM=7.000'de, SPM'de olduğu gibi, kırmızı bir sinyal gözlemlenmediği sürece hemen hemen her periyotta minör proaktif bakım yapmak, yani $f=1$, hem düzeltici hem de majör proaktif muadillerinden önemli ölçüde daha iyi performans göstermesini sağlar.



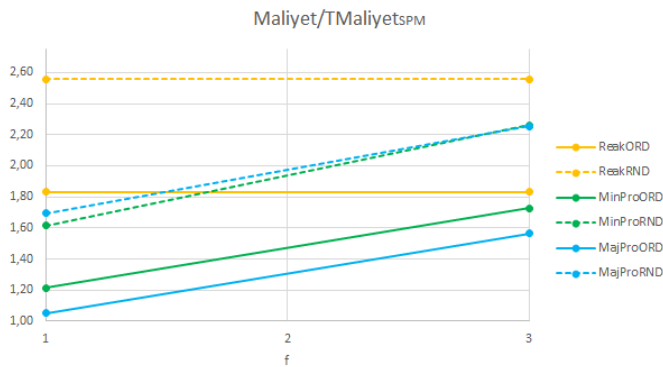
Şekil 44. Benzer yaşlanmalarda DM=7.000 için bakım politikaları

Tablo 59. Benzer yaşlanmalarda DM=7.000 için sonuçlar

Strateji	f	TMaliyet	GH Grup
SPM	-	162.393	E
MinProORD	1	186.109	D,E
MajProORD	5	209.643	C,D
ReakORD	-	216.650	C
MinProRND	1	243.503	B,C
MajProRND	9	282.489	A,B
ReakRND	-	296.137	A

SPM ile önceden belirlenmiş politikaların performansı 70.000 gibi ekstrem bir DM değerinde de incelenmiştir. Çok yüksek DM değerlerinde sık proaktif bakım şarttır. Politikaların davranışı, 1 ve 3 f proaktif bakım aralıkları için Şekil 45'te ve test sonuçları da Tablo 60'da sunulmuştur. DM=70.000'de, $f=1$ aralığında hem MajProORD hem de MinProORD maliyetlerinin SPM'inkinden

istatistiksel olarak farklı olmadığını görmek ilginçtir. Reaktif yöntemler, ReakORD ve ReakRND, $f=1$ 'deki proaktif yöntemlerden daha kötü maliyet veren politikalarla sonuçlanır, bu da böyle büyük bir DM değerinde düzeltici yöntemlerin tercih edilmediğini gösterir. Ayrıca, bu DM değerinde proaktif (hem majör hem de minör) politikaların SPM politikasına istatistiksel olarak yakın olduğu tespit edilmekle beraber MajProORD ($f=1$) politikası SPM'in maliyetine daha yakın bir maliyet çıkarmıştır. Dolayısıyla çok yüksek duruş maliyetlerinde her periyotta gerçekleşen proaktif bakımın türünün de daha etkili bir bakım olan majör olması performansı açısından önemlidir.



Tablo 60. Benzer yaşlanmalarda DM=70.000 için sonuçlar

Strateji	f	TMaliyet	GH Grup
SPM	-	891.416	C
MajProORD	1	938.193	C
MinProORD	1	1.081.340	C
MinProRND	1	1.440.899	B
MajProRND	1	1.511.439	B
ReakORD	-	1.632.404	B
ReakRND	-	2.279.184	A

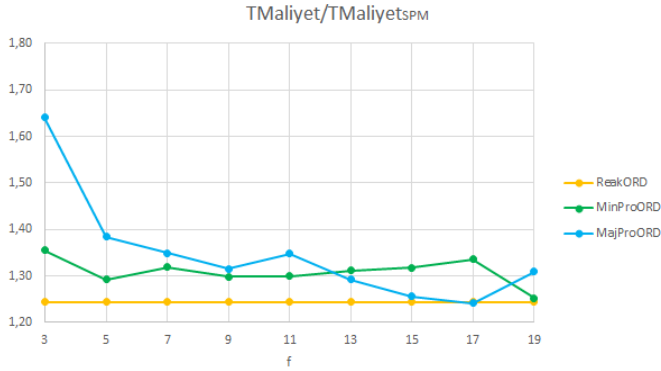
Şekil 45. Benzer yaşlanmalarda DM=70.000 için bakım politikaları

4.5.13 Farklı Yaşlanma Davranışları Altındaki Karşılaştırmalar

Önceki bölümde, ORD bileşen seçim yöntemini kullanan bazı önceden tanımlı politikalar SPM politikası ile istatistiksel olarak farklı olmayan sonuçlar vermektedir. Her ne kadar bu tarz politikalar, eniyileme yöntemleri destekli olmadığından, her durumda iyi sonuç vermese de belli parametre değerlerini ayarlayıp bir POMDP politikasını taklit ederek bazı durumlarda iyi sonuçlar alınması mümkündür. Bileşenlerin benzer yaşlanma davranışlarına sahip olduğu durumda DM=7.000 iken $f=1$ ile MinProORD, DM=70.000 olduğunda da $f=1$ ile MajProORD ve MinProORD bu duruma örnek verilebilir. Bu performansın farklı yaşlanma davranışı olan bileşenlere sahip sistemler için de geçerli olup olmayacağını incelemek için bileşenlerin geçiş olasılıkları C1, C2, C3 ve C4 için sırasıyla 0,99, 0,96, 0,93 ve 0,90 olarak değiştirilmiştir. ORD yöntemini kullanan politikalar, önceki bölümdeki DM ve f değerlerinde tekrar test edilerek sonuçlar, Şekil 46- 48 ve Tablo 61- 63'de sırasıyla verilmiştir.

Politikaların davranışı ve Games-Howel test sonuçları incelendiğinde, SPM politikasının test

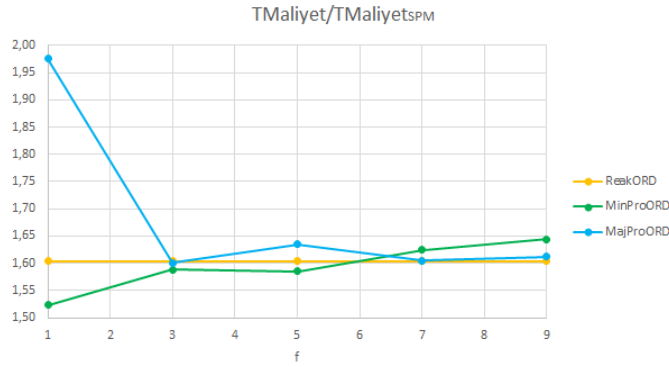
edilen DM değerlerinde diğer politikalardan farklı olduğu görülmektedir. Bu sonuç, önceden tanımlanmış politikaların performansının sistem yapısına bağlı olmasına rağmen, SPM'in her zaman sistem yapısından bağımsız olarak sağlam politikalar verdiğini gösterir. SPM politikasını taklit ederek bir noktaya kadar dışardan verilen politikaların kalitesi geliştirilmeye çalışılabilir. Ancak, bu politika her durumda iyi bir performans vermeyi garanti etmez. Bir başka önemli nokta, önceden tanımlanmış bu tarz politikalarda, zaman ve bileşenlerin bakım kararlarının birbirinden ayrılmasıdır, bu da optimum ortak (joint) bakım kararının bulunmasını engeller.



Şekil 46. Farklı yaşlanmalarda DM=1.000 için sonuçlar

Tablo 61. Farklı yaşlanmalarda DM=1.000 için bakım politikaları

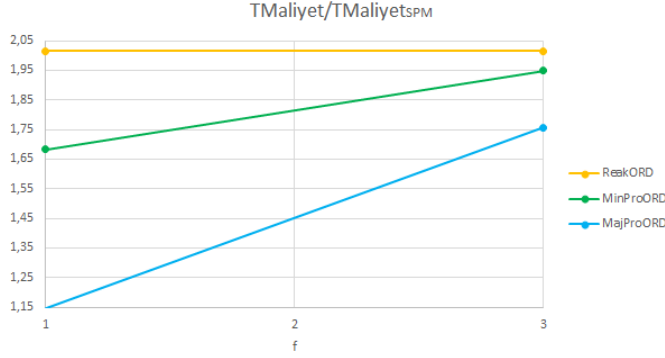
Strateji	f	TMaliyet	GH Grup
SPM	-	73,123	B
MajProORD	17	90,813	A
ReakORD	-	90,973	A
MinProORD	19	91,557	A



Şekil 47. Farklı yaşlanmalarda DM=7.000 için bakım politikaları

Tablo 62. Farklı yaşlanmalarda DM=7.000 için sonuçlar

Strateji	f	TMaliyet	GH Grup
SPM	-	159.423	B
MinProORD	1	242.858	A
MajProORD	3	255.163	A
ReakORD	-	255.669	A



Tablo 63. Farklı yaşlanmalarda DM=70.000 için sonuçlar

Strateji	f	TMaliyet	GH Grup
SPM	-	961.006	D
MajProORD	1	1.212.615	C
MinProORD	1	1.617.387	B
ReakORD	-	1.937.044	A

Şekil 48. Farklı yaşlanmalarda DM=70.000 için bakım politikaları

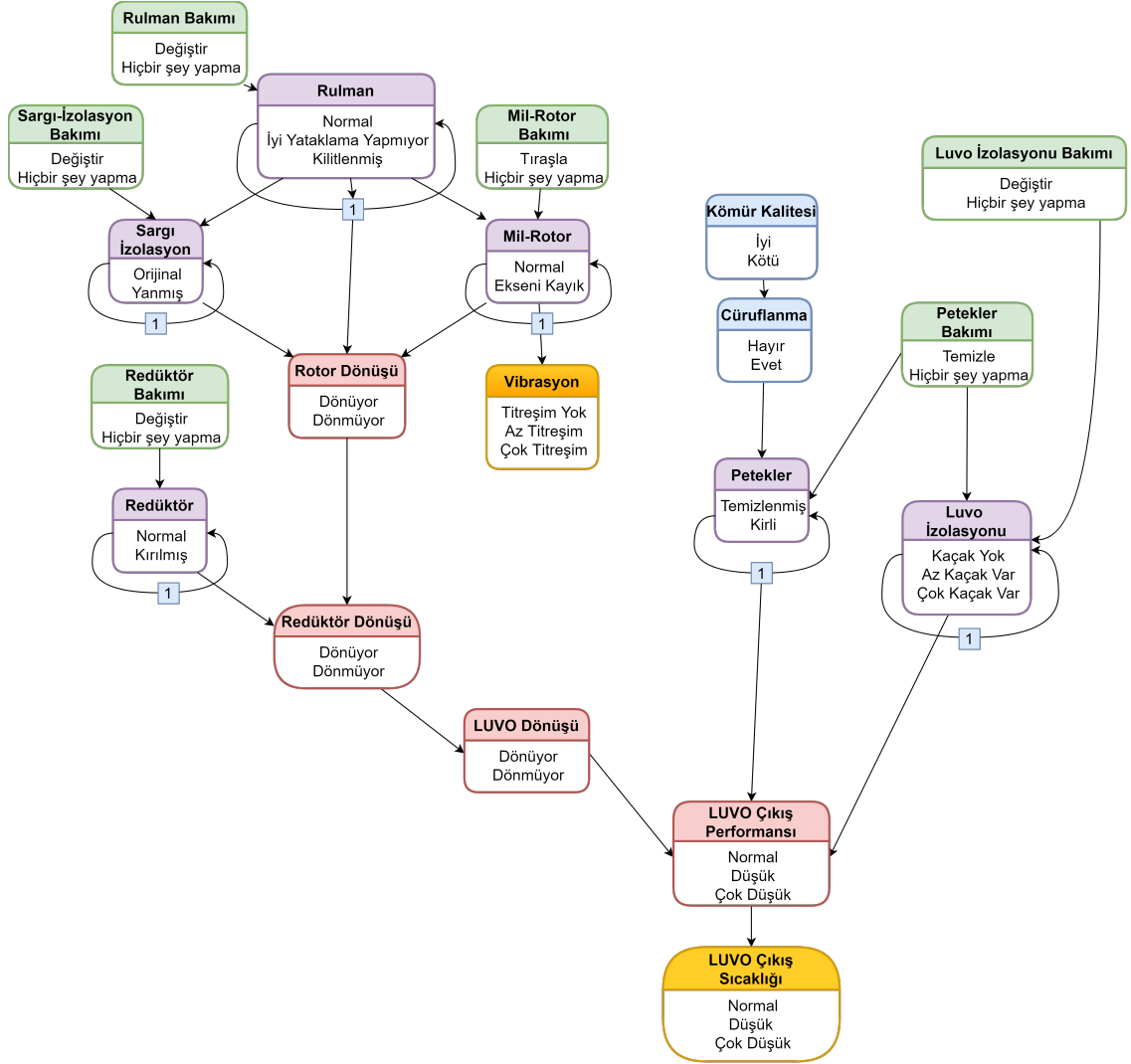
4.6 Tek-hat Luvo Durum Bazlı Bakım Modellemesi Bulguları

Bu bölümde, bir termik santralin ana alt sistemlerinden dönerli hava ısıtıcısının (Luvo) durum bazlı bakım problemi üzerinde çalışılmıştır. Bölüm 3.3'te Luvo sistemi ayrıntılı olarak açıklanmış ve bakım problemi için DBN modeli geliştirilmiştir. Bu model kullanılarak Luvo için Bölüm 3.4'te reaktif bakım ve Bölüm 3.5'te üç değişik proaktif bakım stratejisi önerilmiştir. Bu stratejilerin bulguları Bölüm 4.1-4.3'te verilmiştir. Bu bölümde, Şekil 6'da görünüşü verilen orijinal Luvo sisteminin sadece bir tam hattı (motor grubu) ele alınmıştır. Ayrıca, orijinal modelden farklı olarak, motor grubundan bilgi toplamak için rotor miline yardımcı bir gözlem eklenmiştir. Bu problem "tek-hat Luvo" şeklinde adlandırılıp, faktörlü POMDP olarak formüle edilmiş ve bir fakörlü POMDP çözücüsü olan Symbolic Perseus-MATLAB (SPM) ile çözdürülmüştür. Çeşitli senaryolar altında Luvo'nun durum bazlı bakım problemi için etkili politikalar elde edilmiştir.

4.6.1 Sistem Yapısı

Tek-hat Luvo'nun bakım problemi faktörlü bir POMDP modeli olarak formüle edilmiştir. Düğüm arasındaki ilişkiler Şekil 49'da gösterilmiştir. Modelde dört farklı düğüm tipi vardır: dinamik düğümler, süreç düğümleri, harici düğümler ve gözlem düğümleri. Dinamik ve süreç düğümleri sırasıyla mor ve pembe ile temsil edilirken, gözlem ve harici düğümleri sırasıyla turuncu ve mavi ile gösterilmiştir. "1" ile gösterilen oklar, birbirini izleyen iki zaman dilimi arasındaki zamansal ilişkileri gösterir. Diğer oklar düğümler arasındaki nedensel ilişkileri temsil eder. Rulmanın durumu

hem sargı izolasyonu hem de mil-rotoru etkiler. Bu nedenle, aralarında stokastik bağımlılık vardır. Ayrıca, peteklerin bakımı Luvo izolasyonunun bakımını gerektirdiğinden, petekler ile Luvo izolasyonu arasında yapısal bir bağımlılık vardır. Luvo'nun sistemsel ilişkileri ayrıntılı olarak Bölüm 3.3.2'de açıklanmıştır. POMDP modelinde kullanılan tek-hat Luvo sistemine ait düğümler ve bunların durum uzayları Tablo 64'te gösterilmiştir. Ayrıca tek-hat Luvo POMDP modelinin tüm olasılık tabloları Ek D'de verilmiştir.



Şekil 49. Tek-hat Luvo sisteminin faktörlü POMDP modellemesi

Tablo 64. Tek-hat Luvo sistemin düğümler ve durum uzayları

Düğüm	Düğüm Türü	Gözlemlenebilirlik	Durum Uzayı
Rulman	Dinamik	Gözlemlenemez	{Normal, İyi yataklama yapmıyor, Kilitlenmiş}
Sargı-İzolasyon	Dinamik	Gözlemlenemez	{Orijinal, Yanmış}
Mil-Rotor	Dinamik	Gözlemlenemez	{Normal, Ekseni Kayık}
Redüktör	Dinamik	Gözlemlenemez	{Normal, Kırılmış}
Petekler	Dinamik	Gözlemlenemez	{Temizlenmiş, Kirli}
Luvo İzolasyonu	Dinamik	Gözlemlenemez	{Kaçak Yok, Orta Seviye Kaçak, Yüksek Seviye Kaçak}
Cürufanma	Harici	Gözlemlenemez	{Hayır, Evet}
Kömür Kalitesi	Harici	Gözlemlenemez	{İyi, Kötü}
Rotor Dönüşü	Süreç	Gözlemlenemez	{Dönüyor, Dönmüyor}
Redüktör Dönüşü	Süreç	Gözlemlenemez	{Dönüyor, Dönmüyor}
Luvo Dönüşü	Süreç	Gözlemlenemez	{Dönüyor, Dönmüyor}
Luvo Çıkış Performansı	Süreç	Gözlemlenemez	{Normal, Düşük, Çok Düşük }
Luvo Çıkış Sıcaklığı	Gözlem	Gözlemlenebilir	{Normal, Düşük, Çok Düşük }
Vibrasyon	Gözlem	Gözlemlenebilir	{Titreşim Yok, Az Titreşim, Çok Titreşim}

4.6.2 Eylem Yapısı

Şekil 49'da yeşil renkle temsil edilen altı bakım faaliyeti vardır. “Bir şey yapma” eylemi gerçekleştirildiğinde, sistem doğal yaşlanma süreciyle yaşlanırken, “Yenile” eylemiyle ilgili bileşen yenisiyle değiştirilir. Peteklerdeki “Temizle” eylemi, özel bazı kimyasalların kullanılarak peteklerin özel temizliğini ifade ederken, Mil-rotora özgü “Tıraşla” eylemi, bir eksen kayması durumunda rotorun tıraşlanmasını temsil eder. Tek-hat Luvo POMDP modeline ait eylem düğümleri bilgileri Tablo 65'te sunulmuştur.

Tablo 65. Tek-hat Luvo POMDP modelindeki eylem düğümleri

Eylem Düğümleri	Eylem Uzayı	Etkilenen Bileşen
Rulman Bakımı	{Değiştir, Bir şey yapma}	Rulman
Sargı-İzolasyon Bakımı	{Değiştir, Bir şey yapma}	Sargı-İzolasyon
Mil-Rotor Bakımı	{Tıraşla, Bir şey yapma}	Mil-Rotor
Redüktör Bakımı	{Değiştir, Bir şey yapma}	Redüktör
Luvo İzolasyonu Bakımı.	{Değiştir, Bir şey yapma}	Luvo İzolasyonu
Petekler Bakımı	{Temizle, Bir şey yapma}	Petekler, Luvo İzolasyonu

4.6.3 Maliyet Yapısı

Her periyotta ortaya çıkan bakım maliyeti, alınan gözlem, yapılan bakım işlemi, bakım süresi ve birim duruş maliyetine bağlıdır. Toplam bakım maliyeti, duruş maliyeti ve ilgili bileşenin bakım maliyetinden oluşur. Tek-hat Luvo sistemi için, normal veya düşük sıcaklık ölçümü gözlemlendiğinde saatte 10.000 TL duruş maliyeti meydana gelir ve çok düşük sıcaklık ölçümü alındığında saatte 25.000 TL duruş maliyeti ortaya çıkar. Bileşenlere yapılan bakım eylemlerinin süresi alınan gözleme bağlı olup normal veya düşük sıcaklık ölçümü gözlemlendiğindeki bakım süresi çok düşük sıcaklık ölçümü alındığındaki sürenin yarısı olarak belirlenmiştir. Alınan gözlemlere bağlı olarak her bir bileşenin ilgili bakım eylemi maliyeti ve duruş maliyetleri (bakımın yapıldığı zamanda gereken bakım süresinin birim duruş maliyeti ile çarpılmasıyla elde edilen) Tablo 66'da verilmiştir. Tabloda bakım süresi olarak verilenler, çok düşük sıcaklık ölçümü alındığında yani düzeltici bakım uygulandığındaki sürelerdir.

Tablo 66. Tek-hat Luvo sisteminin bakım maliyetleri

Bileşen	Bakım Süresi (saat)	Gözlem			
		Yok/Düşük		Çok düşük	
		Eylem Maliyeti	DM	Eylem Maliyeti	DM
Rulman	1	1.000	10.000	2.000	25.000
Sargı-İzolasyon	4	7.500	40.000	15.000	100.000
Mil-Rotor	4	750	40.000	1.500	100.000
Redüktör	2	1.000	20.000	2.000	50.000
Luvo İzolasyon	2	50	20.000	100	50.000
Petekler	6	800	60.000	1.600	150.000

4.6.4 Tek-hat Luvo Faktörlü POMDP Modellemesi

Tek-hat Luvo sistemi faktörlü bir POMDP olarak formüle edilmiş ve SPM (Poupart, 2005) kullanılarak bakım politikası bulmak için çözdürülmüştür. Tek-hat Luvo sistemi düz POMDP gösterimiyle modellenseydi, her eylemin durum geçişi için $13,824 \times 13,824$ boyutunda kare matris kullanılması gerekecekti. Ancak kullanılan faktörlü modelle koşullu bağımsızlıklardan yararlanılarak, Bölüm 4.5.4'te açıklandığı üzere geçiş matrisinin bu büyük yükü azaltılmıştır.

İndirim faktörü 0,9999 olarak ayarlanmıştır. SPM, bakım politikaları oluşturmak için sonsuz

ufukta çalıştırılmış ve politikalar, 900 günlük zaman ufkunda (planlanan bakım süresi hariç üç yıl) 100 kez simüle edilmiştir. Duyarlılık analizleri farklı birim duruş maliyeti altında gerçekleştirilmiştir. POMDP çözücüsü tarafından elde edilen bakım politikasının performansını karşılaştırmak için önceden tanımlanmış iki düzeltici politika önerilmiştir. Olasılıklar ve bakım maliyetleri açısından sistemin kritik bileşenlerini belirlemek için politika analizleri yapılmıştır. Harici değişkenlerin Tek-hat Tek-hat Luvo sistemi üzerindeki etkilerini vurgulamak için çeşitli senaryolar tasarlanmıştır. Ayrıca politika, gözlem uzayını kısıtlayıp genişleterek ve eylem uzayına bir denetim düğümü ekleyerek analiz edilmiştir.

4.6.5 Önceden Tanımlanmış Politikalarla Karşılaştırmalar

POMDP çözücüsü tarafından oluşturulan politikanın performansını analiz etmek için, ayrıntıları Bölüm4.5.6'da verilen, iki tane önceden tanımlanmış düzeltici bakım politikası olan ReakORD (Reaktif Sıralı) ve ReakRND (Reaktif Rastgele) kullanılmıştır.

25.000 TL duruş maliyeti için duyarlılık analizi sonuçları Tablo 67'de verilmiştir. Tabloda, TMaliyet, TÇokDüşük, 900 günlük bir zaman ufku için sırasıyla toplam maliyet, alınan toplam ÇokDüşük ölçümlerinin sayısını göstermektedir. Bu ölçümlerin ortalama ve standart sapmaları tabloda belirtilmiştir. Ayrıca, her bir bileşen için ortalama toplam yenileme de tabloda verilmektedir. Tutarlı bir karşılaştırma yapmak için, baz POMDP politikasının yanı sıra, POMDP modelinde proaktif bakım için herhangi bir maliyet avantajı sağlamayan ve böylece politikayı reaktif davranmaya zorlayan "SPM-Düz" adlı bir politika üretilmiştir. ReakRND politikasının maliyeti, daha etkili bileşen seçimi yapan ORD politikasının maliyetinden oldukça yüksektir. ReakORD stratejisi, ReakRND stratejisinden çok daha iyi sonuçlar vermesine rağmen; maliyeti her iki SPM politikasından daha yüksektir. Bunun nedeni, Tek-hat Luvo sisteminin maliyet ve yaşlanma davranışı yapısı açısından farklı bileşenlerden oluşması ile açıklanabilir. Örneğin, SPM politikası rulmanı diğerlerinden daha fazla yenilerken, ORD stratejisi dengeli bir seçim politikası oluşturur. Fakat, bileşenlerin düzenli bir şekilde yenilenmesi gereksiz bakıma neden olabilir. Tablo 67'den görülebileceği gibi, peteklere ReakORD stratejisi ile ortalama 2,94 kez bakım yapılmıştır. Peteklerin reaktif duruş maliyetlerinin 150.000 olduğu düşünüldüğünde, toplam maliyetin 445.000'inin peteklerin bakımından geldiği açıktır. Bu sonuç, durum bazlı bakım stratejilerinin başarısını göstermektedir. Elde edilen POMDP politikaları, bakım eylemleri, gözlem ve eylem geçmişi tarafından sağlanan bilgilerden gelen inançlar kullanılarak uyarlanmış olarak belirlendiğinden çok daha önemli hale gelir.

Tablo 67. DM=25.000 olduğunda önceden tanımlanmış politikalarla karşılaştırma

BRDM	TMaliyet		TÇokDüşük		TBakım		TBakımPro		Bileşen Bakımları					
	Ort	Ss	Ort	Ss	Ort	Ss	Ort	Ss	Rm	SI	MR	Rd	LI	Pt
SPM-Baz	676.816	255.864	14,65	6,26	16,89	6,72	2,24	1,36	9,55	1,26	1,57	2,79	1,72	0,00
SPM-Düz	847.999	353.088	18,12	8,18	18,13	8,17	0,01	0,10	9,61	1,72	1,67	3,84	1,29	0,00
ReakORD	1.800.589	949.227	21,26	10,65	21,26	10,65	0,00	0,00	3,94	3,92	3,80	3,46	3,20	2,94
ReakRND	3.547.248	1.423.050	44,82	16,38	44,82	16,38	0,00	0,00	7,98	7,68	7,42	7,08	7,08	7,58

Diğer önemli bir bulgu, SPM-Baz politikasının, proaktif bakımın maliyet avantajı nedeniyle SPM-Düz politikasına kıyasla “ÇokDüşük” ölçümü beklemeden proaktif bakım yapabilesidir. Böylece gerçekleştirilen proaktif bakım ile 171.183 TL maliyet tasarrufu sağlanmıştır.

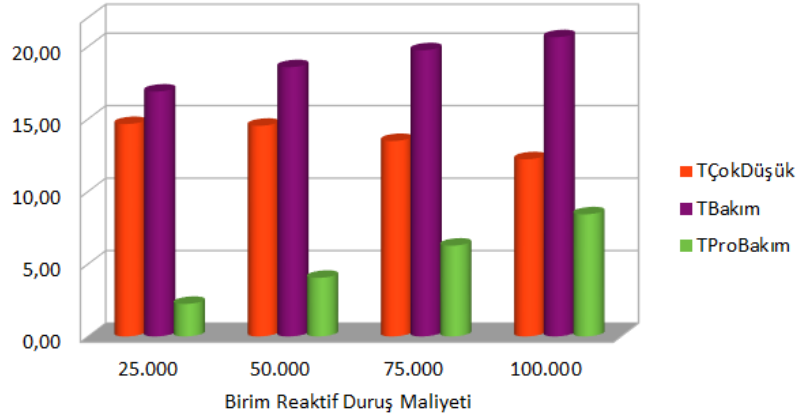
4.6.6 Birim Reaktif Duruş Maliyetlerine Duyarlılık

Bazı birim reaktif duruş maliyet değerleri ile yapılan duyarlılık analizi sonuçları Tablo 68’de verilmiştir. Sonuçlara göre, duruş maliyeti arttıkça, ÇokDüşük sıcaklık ölçümlerinin ortalama toplam sayısı azalırken, ortalama toplam bakım sayısı artmaktadır. Duruş maliyeti arttıkça, ÇokDüşük ölçümü beklemeden proaktif olarak daha fazla bakım yapıldığı söylenebilir. Bu sonuçların önemli bir bulgusu, politikanın peteklere 100.000 duruş maliyetine kadar bakım yapmayı tercih etmemesidir. Bu, peteklerin yüksek bakım süresinden kaynaklanmaktadır. Peteklerin bakım süresi diğer bileşenlere göre nispeten uzun olduğu için bakımları maliyetlidir. Bu nedenle, elde edilen politikaların genel davranışı, peteklere yüksek bir maliyetle bakım yapmak yerine, diğer bileşenlerin durumunu iyileştirerek bakımını sağlamaktadır. Tablodan da görülebileceği gibi, 100.000 duruş maliyetinde politika ortalama 1,2 kez petekler bakımını önermektedir. Politika simülasyon sonuçlarına göre bu bakımların reaktif olmaktan ziyade proaktif olduğu vurgulanmalıdır.

Farklı duruş maliyeti değerleri için ortalama toplam ÇokDüşük ölçüm sayısı, ortalama toplam bakım sayısı ve ortalama toplam proaktif bakım sayısı, Şekil 50’de gösterilmiştir. Burada TBakım ve TBakımPro, duruş maliyeti arttıkça artar. Öte yandan, TÇokDüşük ilk önce değişmez, ardından duruş maliyetindeki artışla azalır. Ek bir bulgu olarak birim duruş maliyeti arttıkça, sistemin daha proaktif bakım yapma eğiliminde olması belirtilebilir, çünkü yüksek duruş maliyeti, sistemin beklenmedik durmalarından kurtulmak için daha proaktif davranmasını tetikler.

Tablo 68. Farklı birim Reaktif DM değerleri altında duyarlılık analizi

BRDM	TMaliyet		TÇokDüşük		TBakım		TBakımPro		Bileşen Bakımları					
	Ort	Ss	Ort	Ss	Ort	Ss	Ort	Ss	Rm	Sl	MR	Rd	Lİ	Pt
25.000	676.816	255.864	14,65	6,26	16,89	6,72	2,24	1,36	9,55	1,26	1,57	2,79	1,72	0,00
50.000	1.327.721	558.467	14,53	6,56	18,57	7,94	4,04	2,10	8,95	1,42	1,67	3,28	3,25	0,00
75.000	1.926.710	767.268	13,48	5,71	19,74	7,48	6,26	2,56	8,77	1,27	1,81	2,97	4,92	0,00
100.000	2.125.404	924.524	12,22	5,32	20,64	6,28	8,42	2,05	8,09	1,40	1,71	2,91	5,33	1,20



Şekil 50. Farklı birim reaktif DM değerleri altında TÇokDüşük, TBakım ve TBakımPro sayıları

4.6.7 Bileşenlerin Maliyetlerine Duyarlılık

Tek-hat Luvo, farklı yaşlanma davranışları, bakım süreleri ve aralarında bağımlılıkları olan bileşenleri içeren karmaşık bir sistemdir. Bu bölümde, bakım maliyetinden bağımsız olarak bileşenlerin önemini anlamak için sadece bileşenlerin olasılıklarını dikkate alan bir politika oluşturmak için “SPM-AynıMaliyet” adlı bir senaryo geliştirilmiştir. Bu, tüm bileşenlerin maliyetlerini POMDP modelindeki tüm maliyetlerin medyanı olarak ayarlanmasıyla elde edilmiştir. Sonuçlar Tablo 69’da verilmiştir.

Bu senaryonun sonucunda, politika peteklere 4,81 adet bakım önerirken Luvo izolasyonuna herhangi bir bakım önermemektedir. Bunun nedeni yapısal bağımlılıktır; yani peteklere bakım yapma aktivitesi esnasında hem peteklere hem de Luvo izolasyonuna bakım yapılır. Sonuç olarak, petekler bakımı yapıldıktan sonra, hem petekler hem de Luvo izolasyonu en iyi durumlarına

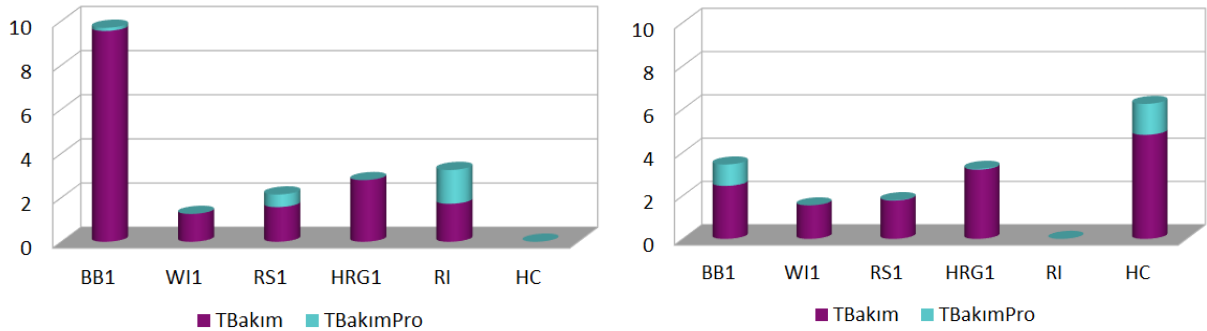
Tablo 69. Bileşenlerin maliyetlerine duyarlılık

BRDM	TMaliyet		TÇokDüşük		TBakım		TBakımPro		Bileşen Bakımları					
	Ort	Ss	Ort	Ss	Ort	Ss	Ort	Ss	Rm	SI	MR	Rd	LI	Pt
SPM-Baz	676.816	255.864	14,65	6,26	16,89	6,72	2,24	1,36	9,55	1,26	1,57	2,79	1,72	0,00
SPM-AynıMaliyet	1.119.140	500.970	11,30	5,70	13,78	6,25	2,48	1,57	2,45	1,55	1,77	3,20	0,00	4,81

geçer. Her iki bakımın da tek bir maliyetle gerçekleştirilmesi mümkün olduğundan, politika Luvo izolasyonu üzerinde bakım yapmayı tercih etmez.

Öte yandan, SPM-AynıMaliyet politikası ortalama 2,45 rulman bakımı önerirken, SPM-Baz politikası ortalama 9,55 rulman bakımı önermektedir. Maliyetleri içeren SPM-Baz politikasında, rulman diğer bileşenlerden daha ucuz olduğu için, politika, rulmanı diğer bileşenlerden çok daha fazla değiştirerek sistemin durumunu iyileştirme eğilimindedir. Ancak, rulmanı çok fazla değiştirmek, diğer bileşenlerin ihtiyaç duydukları bakımdan mahrum kalmasına neden olabilir.

SPM-Baz ve SPM-AynıMaliyet politikaları tarafından önerilen ortalama toplam bakım sayısının ve ortalama toplam proaktif bakım sayısının sonuçları Şekil 51'de grafiksel olarak gösterilmiştir. Sonuçlardan da görülebileceği gibi, rulman ve peteklere SPM-Baz politikasındaki diğer bileşenlere kıyasla daha çok proaktif bakım faaliyeti önerilmektedir. Bu durum, bu bileşenlerin sistemin kritik bileşenleri olduğunu gösterebilir.



(a) SPM-Baz

(b) SPM-AynıMaliyetler

Şekil 51. Bileşenlerin bakım dağılımı

4.6.8 Kritik Bileşenlere Duyarlılık

Önceki bölümde elde edilen sonuçlara göre rulman ve petekler tek-hat Luvo'nun kritik bileşenleridir. Daha fazla analiz yapmak için, modelde peteklerin bakım süresi altı saatten iki saate düşürülmüştür. Başka bir senaryo olarak da rulmanın bakım süresi bir saatten iki saate çıkarılmıştır. Sonuçlar Tablo 70'te verilmiştir. Tablodan görülebileceği gibi, peteklerin bakım süresi azaldığında peteklere bakım yapılır. Ayrıca, alınan toplam ÇokDüşük sinyal sayısı ve toplam bakım sayısı da azalır. Toplam maliyette de beklendiği gibi bir azalma görülmüştür. Rulmanın bakım süresinin iki katına çıktığı senaryonun sonucunda ise rulmana daha az bakım yapıldığı ve bunun yerine farkedilir biçimde redüktöre daha fazla bakım yapıldığı gözlemlenmiştir. Redüktör, tek-hat Luvo sisteminin önemli bir bileşenidir, dönmediği zaman sistem anında durur.

Tablo 70. Kritik bileşenlere duyarlılık

BRDM	TMaliyet		TÇokDüşük		TBakım		TBakımPro		Bileşen Bakımları					
	Ort	Ss	Ort	Ss	Ort	Ss	Ort	Ss	Rm	SI	MR	Rd	LI	Pt
SPM-Baz	676.816	255.864	14,65	6,26	16,89	6,72	2,24	1,36	9,55	1,26	1,57	2,79	1,72	0
SPM-Rulman (2 saat)	870.357	362.696	13,38	6,07	15,61	6,18	2,23	1,46	2,75	1,65	2,00	5,38	3,83	0,00
SPM-Petekler (2 saat)	606.882	269.218	10,87	4,82	13,78	5,36	2,91	1,54	5,61	1,34	1,61	3,00	0,00	2,22

4.6.9 Harici Değişkenlere Duyarlılık

Kömür kalitesi ve cürufanma tek-hat Luvo sistemi için iki önemli harici bileşendir. Isı değişimini engelleyen cüruf, ısı transfer yüzeylerinde çok küçük kül parçacıkları olduğunda meydana gelir. Kömür kalitesi cürufanmayı doğrudan etkiler. Çünkü düşük kaliteli kömür önce gaz sıcaklığını artırır ve sonra cüruflanır. Duyarlılık analizinde düşük kaliteli kömür kullanma olasılığı sırasıyla 0,5 ve 0,7 olarak alınmış, sonuçlar Tablo 71'de verilmiştir. Kömür kalitesi düştükçe, alınan ortalama toplam ÇokDüşük sinyali sayısı ve toplam bakım maliyeti de artar.

Tablo 71. Farklı kömür kalitesi olasılıkları ile duyarlılık analizi

Kömür Kalitesi (Düşük)	TMaliyet		TÇokDüşük		TBakım		TBakımPro		Bileşen Bakımları					
	Ort	Ss	Ort	Ss	Ort	Ss	Ort	Ss	Rm	SI	MR	Rd	LI	Pt
0,5	676.816	255.864	14,65	6,26	16,89	6,72	2,24	1,36	9,55	1,26	1,57	2,79	1,72	0,00
0,7	769.642	349.826	15,41	7,43	18,28	8,28	2,87	1,85	9,20	1,65	1,89	3,53	2,01	0,00

Daha önce de belirtildiği gibi, kömür kalitesi doğrudan cürufanmayı etkiler. Baz senaryoda

kömür kalitesi düşük olduğunda cüruf lanma olasılığı (p) 0.4'tür. Duyarlılık analizleri sırasıyla p = 0.4 (Baz), 0.6 ve 0.8 için yapılmış ve sonuçları Tablo 72'de verilmiştir. Cüruf lanma olasılığı arttıkça, alınan ÇokDüşük sinyallerinin toplam sayısı, gerçekleştirilen bakım faaliyetlerinin toplam sayısı ve toplam bakım maliyeti artmaktadır. Tabloda gözlemlenen kayda değer bulgulardan biri, cüruf lanma olasılığı arttıkça bakım sayısındaki artıştır. Normal şartlar altında, cüruf ve petekler arasındaki yapısal ilişki nedeniyle petekler bakımının yapılması beklenir. Bununla birlikte, politika, yüksek bakım maliyeti nedeniyle peteklere bakım yapmaktan kaçınır. Bunun yerine, peteklerden nispeten daha ucuz olan Luvo izolasyonunun durumunu iyileştirmeyi tercih eder.

Tablo 72. Farklı cüruf lanma olasılıkları ile duyarlılık analizi

Cüruf lanma	TMaliyet		TÇokDüşük		TBakım		TBakımPro		Bileşen Bakımları					
	Ort	Ss	Ort	Ss	Ort	Ss	Ort	Ss	Rm	SI	MR	Rd	LI	Pt
0,4	676.816	255.864	14,65	6,26	16,89	6,72	2,24	1,36	9,55	1,26	1,57	2,79	1,72	0,00
0,6	704.673	311.058	14,67	6,81	17,89	7,66	3,22	1,63	9,53	1,33	1,70	2,83	2,50	0,00
0,8	767.738	315.181	14,96	7,01	18,32	8,00	3,36	1,89	8,68	1,64	1,84	3,43	2,73	0,00

Politikanın peteklere hangi durumda bakım önerdiğini anlamak için düşük kömür kalitesi kullanma olasılığı 0,9 olduğunda peteklerin bakım süresini dört ve iki saate düşürerek yeni bir senaryo analizi yapılmış, sonuçları Tablo 73'te verilmiştir. Peteklerin bakım süresi iki saate düşürüldüğünde, kömürün kalitesi çok düşük olduğunda politika ortalama 2,51 petekler bakımını önerir. Bu bakım faaliyetlerinin 2,46'sının proaktif olarak gerçekleştirildiğini belirtmek önemlidir. Politikanın sistemi cüruf lanma tehlikesine karşı koruma eğiliminde olduğu söylenebilir. Bu nedenle, alınan toplam ÇokDüşük sayısında dikkate değer bir azalma elde edilir. Bu, tek-hat Luvo sisteminin bakım planlamasında maliyetler ve olasılıklar arasındaki ilişkinin önemini göstermek için iyi bir örnektir.

Tablo 73. Peteklerin bakım süresi ile duyarlılık analizi

Petek Bakım	TMaliyet		TÇokDüşük		TBakım		TBakımPro		Bileşen Bakımları					
	Ort	Ss	Ort	Ss	Ort	Ss	Ort	Ss	Rm	SI	MR	Rd	LI	Pt
2 saat	660.936	314.515	11,32	5,37	14,70	5,96	3,38	1,48	5,60	1,70	1,68	3,21	0,00	2,51
4 saat	941.999	365.959	19,80	7,08	23,40	7,48	3,60	1,42	12,20	1,80	2,00	4,00	3,40	0,00
6 saat	9.189.085	6.029.555	353,09	235,25	saat,13	235,49	2,04	1,29	349,73	0,98	0,00	2,60	1,82	0,00

4.6.10 Gözlem Uzayına Duyarlılık

Luvonun oijinal modeli (Özgür-Ünlüakın vd., 2019) yalnızca Luvo çıkış sıcaklığının performansını ölçen bir gözlem düğümüne sahiptir. Bu çalışmada, motor grubundan bilgi toplayarak politikanın kalitesini artırmak için mil-rotora yardımcı bir gözlem eklenmiştir. Modelin gözlem uzayına duyarlılığını incelemek için İki farklı senaryo tasarlanmıştır. İlk senaryo, “YardımcıGözlemYok” senaryosudur ve tüm dönemlerde yardımcı gözlem alan sinyaller kaldırılmıştır. İkinci senaryo ise “MaliyetliGözlem” senaryosudur ve bu gözlem 120 TL’lik bir denetim maliyeti ile istenildiğinde alınabilmektedir. Bu ikinci durumda, denetim modelde başka bir eylem olarak tanımlanır. Gözlem uzayı senaryolarının karşılaştırılması (YardımcıGözlemYok, MaliyetliGözlem ve Baz Model) Tablo 74’te verilmiştir. Yardımcı gözlem, motor grubundan daha fazla bilgi sağladığından, elde edilen toplam maliyet, alınan ÇokDüşük ölçümleri ve önerilen toplam bakım sayısı açısından dikkate değer iyileştirme sonuçları elde edilmiştir. “MaliyetliGözlem” senaryosunda yardımcı gözlem ücretli olmasına rağmen politika 900 günün ortalamada 882,49 gününde bu denetim eylemini yaparak yardımcı gözlem bilgisini almayı tercih etmiştir ve toplam maliyeti “YardımcıGözlemYok” senaryosunununkinden daha düşüktür.

Tablo 74. Farklı gözlem uzayları için duyarlılık analizi

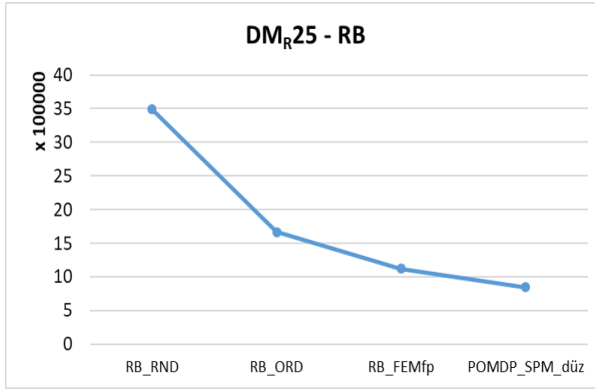
Senaryo	TMaliyet		TÇokDüşük		TBakım		TBakımPro		Bileşen Bakımları						Denetim
	Ort	Ss	Ort	Ss	Ort	Ss	Ort	Ss	Rm	Sl	MR	Rd	Ll	Pt	
YardımcıGözlemYok	895.460	389.846	17,35	7,15	19,91	7,43	2,56	1,16	9,41	2,15	2,31	3,91	2,13	0,00	-
MaliyetliGözlem	719.480	305.116	15,00	6,77	900,00	0,00	885,00	6,77	9,55	1,34	1,96	2,80	1,86	0,00	882,49
Baz Model	676.816	255.864	14,65	6,26	16,89	6,72	2,24	1,36	9,55	1,26	1,57	2,79	1,72	0,00	900

4.7 Tek-hat Luvo Sisteminin DBN ve POMDP bazlı Bakım Politikalarının Karşılaştırılması

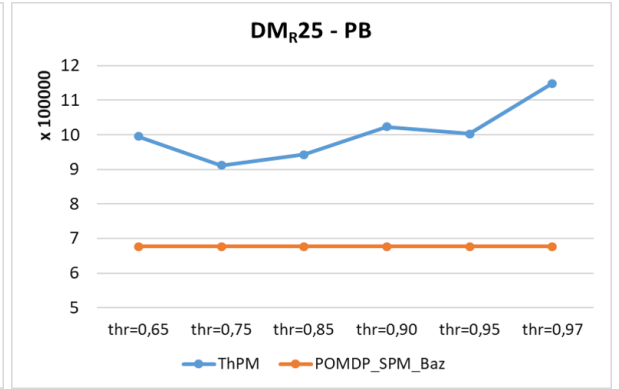
Bu bölümde tek-hat Luvo gibi çok-bileşenli bir sistem için iki farklı olasılıklı grafiksel model kullanılarak değişik bakım stratejileriyle politikalar elde edilmiştir. Ele alınan süreç stokastik olduğundan politikaların analizleri ve karşılaştırmaları replikasyon ortalamaları baz alınarak yapılmıştır. DBN’ler karmaşık sistemsel ilişkilerin ve zamansal değişimlerin modellenmesi ile olasılık çıkarımları konularında çok başarılı olup eniyileme yapmazlar. Ancak DBN bazlı geliştirilen sezgiseller eniyileme problemlerinde kullanılabilirler. Diğer yandan POMDP’ler sıralı karar problemlerinde çok başarılı olup eniyileme yaparlar. Ancak POMDP’lerin de boyutluluk ve geçmiş

problemleri olduğundan küçük boyutlu problemler dışında en iyi sonucu bulmakta zorlanırlar. Böyle durumlarda, geliştirilmiş yaklaşık algoritmaları kullanarak yaklaşık çözümler elde edilebilir.

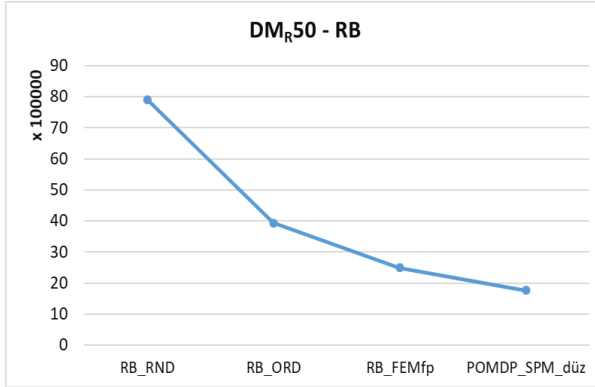
Proje kapsamında geliştirilen DBN ve POMDP bazlı bakım yöntemlerinin maliyetleri Şekil 49'da verilen tek-hat Luvo sistemi kullanılarak 900 günlük planlama ufunda 0,9999 indirim faktörüyle 100 replikasyon çalıştırarak kıyaslanmıştır. Kıyaslama Bölüm 4.3.1'de verilen DM_{R25} ve DM_{R50} senaryolarının maliyetleri dikkate alınarak yapılmıştır. Şekil 52-53, DM_{R25} için, Şekil 54-55 ise DM_{R50} için DBN ve POMDP yaklaşımlarının sırasıyla reaktif ve proaktif bakım için karşılaştırılmalarını göstermektedir.



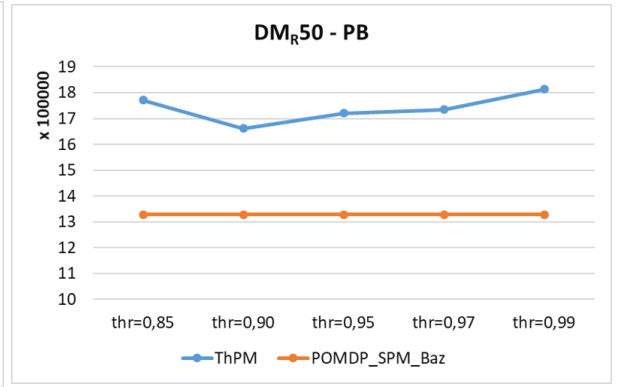
Şekil 52. DM_{R25} 'te DBN ve POMDP bazlı reaktif bakımların karşılaştırılması



Şekil 53. DM_{R25} 'te DBN ve POMDP bazlı proaktif bakımların karşılaştırılması



Şekil 54. DM_{R50} 'te DBN ve POMDP bazlı reaktif bakımların karşılaştırılması



Şekil 55. DM_{R50} 'te DBN ve POMDP bazlı proaktif bakımların karşılaştırılması

Reaktif bakım (RB) karşılaştırılmasında görülen RND ve FEM_{fp} , Bölüm 3.4'de anlatılan

yöntemlerdir. RB_ORD yöntemi ise bileşenlerin her reaktif bakım anında sırayla seçildiği bir yöntemdir. POMDP_SPM_düz ise Bölüm 4.6.5'te açıklandığı gibi SPM çözücüsünün düzeltici bakıma teşvik edildiğinde elde edilen politikadır.

Proaktif bakım için karşılaştırma yapılırken, DBN ile yapılan proaktif bakım modellemesinde en iyi sonucu veren ThPM yöntemi seçilmiştir. Sonuçlara göre hem reaktif hem proaktif bakımda, her iki senaryoda da POMDP daha az maliyet, yani daha iyi sonuç vermektedir. Bunun nedeni POMDP'lerde çözüm yöntemi olarak eniyileme tekniklerinin kullanılması ve bakım eylemlerinin gözlem ve eylem geçmişi tarafından sağlanan bilgiler kullanılarak uyarlanabilir şekilde belirlenmesidir. Diğer yandan geliştirilen DBN bazlı reaktif ve proaktif bakım algoritmaları bakım kararlarını, önce bakım zamanı sonra bakım eyleminin belirlenmesi şeklinde hiyerarşik olarak iki seviyede aldığından optimum ortak (joint) bakım kararının bulunmasını engeller. Ancak POMDP'ler, DBN'lere kıyasla boyutluluk problemiyle daha hızlı karşılaşırlar. Örneğin POMDP'nin Şekil 7'deki gibi daha karmaşık ve büyük durum uzaylarına sahip iki-hat Luvo sisteminde zorlandığı göz önünde bulundurularak, POMDP bazlı model ve çözümlerin her durumda DBN bazlı model ve çözümlerden kesinlikle daha iyi olduğuna dair kesin bir sonuca varılamayacağı söylenebilir. Yöntem seçiminin, sistemin karmaşıklığına göre yapılması daha uygun olur.

5 TARTIŞMA VE SONUÇLAR

Bu projenin amacı bileşenleri arasında çeşitli bağımlılıkları olan kısmen gözlemlenebilir karmaşık çok-bileşenli sistemlerin bakım eniyilemesinde DBN ve POMDP olasılıklı grafiksel modellerinin kullanımını keşfetmek, bu tarz problemleri temsil edecek bir gerçek-hayat problemi üstünden konuyu ele alıp bu problem için DBN ve POMDP modelleri geliştirmek ve bu modeller yardımıyla etkin bakım politikaları oluşturmaktır.

Elektrik santralleri, birbirleriyle etkileşimli bileşenlerden oluşan karmaşık sistemlere sahiptir. Beklenmeyen bir arıza çok ciddi maliyetlere neden olacağından dolayı bakım eniyilemesi, bu sektör için çok kritiktir. Elektrik santrallerindeki çok-bileşenli sistemlerin bakım eniyilemesi, bildiğimiz kadarıyla, daha önceden çalışılmamıştır. Çok-bileşenli sistemlerin bakım eniyileme problemi de, henüz literatürde az çalışılmış olup tek-bileşenli sistemlerin bakım eniyilemesinden daha zordur.

Bu çalışmada termik santrallerdeki çok-bileşenli kritik sistemlerden biri olan Luvo sistemi için iki farklı olasılıklı grafiksel model kullanılarak değişik bakım stratejileriyle politikalar elde edilmiştir. Ele alınan süreç stokastik olduğundan politikaların analizleri ve karşılaştırmaları replikasyon ortalamaları baz alınarak yapılmıştır. DBN'ler karmaşık sistemsel ilişkilerin ve zamansal değişimlerin modellenmesi ile olasılık çıkarımları konularında çok başarılı olup eniyileme yapmazlar. Ancak DBN bazlı geliştirilen sezgiseller eniyileme problemlerinde kullanılabilirler. Diğer yandan POMDP'ler sıralı karar modellerinde çok başarılı olup eniyileme yaparlar. Ancak POMDP'lerin de "boyutluluk" ve "geçmiş" problemleri olduğundan küçük boyutlu problemler dışında en iyi sonucu bulmaları çok zordur. Böyle durumlarda, yaklaşık POMDP algoritmaları kullanılarak yaklaşık çözümler elde edilebilir. Fakat, unutmamak gerekir ki, yaklaşık algoritmalar en iyi çözümü bulmaya çalışmasa bile, bu iki problem hâlâ geçerlidir.

Proje kapsamında ele alınan bakım problemleri için geliştirilen model, çözüm yöntemleri ve analizler yedi bölümde ele alınmıştır.

Bakım Sayısı Odaklı Luvo Reaktif Bakım Problemi ve Analizleri: Luvo sisteminde reaktif bakım stratejisi altında planlama ufku boyunca gerçekleşen bakım sayısını en azlayan bakım yöntemlerinin oluşturulması amaçlanmıştır. Luvo sistemindeki bileşenler arasındaki statik ve zamana bağlı ilişkileri ve bağımlılıkları modellemek ve zamana bağlı olasılıksal çıkarımları yapmak için DBN'ler kullanılmıştır. Çok-bileşenli kısmen gözlemlenebilir sistemler için genel bir DBN bazlı reaktif bakım algoritması geliştirilmiştir. Bir bakım zamanında sistemin durumunu iyileştirecek en uygun bakım eylemini seçmek için değişik verimlilik ölçütleri olan sekiz adet bakım yöntemi

önerilmiştir. DBN bazlı reaktif bakım algoritması uygulanarak bu yöntemlerin performansları Luvo sistemi üzerinde, planlama ufku boyunca gerçekleşen ortalama toplam bakım sayılarına göre, karşılaştırılmış ve en iyileri tespit edilmiştir.

Bakım Maliyeti Odaklı Luvo Reaktif Bakım Problemi ve Analizleri: Luvo sisteminde reaktif bakım stratejisi altında planlama ufku boyunca gerçekleşen bakım maliyetini en azlayan bakım yöntemlerinin oluşturulması amaçlanmıştır. Bakım sayısı odaklı Luvo reaktif bakım problemi için önerilen bakım yöntemleri, maliyet faktörünü de dikkate alacak şekilde farklı versiyonları geliştirilmiştir. Yöntemlerde kullanılan verimlilik ölçütlerindeki olasılık ve maliyet etkilerini dengelemek için bir normalleştirme prosedürü önerilmiş ve maliyetler verimlilik ölçütlerinde kullanılan olasılık değerlerine göre normalleştirilerek olasılıklarla aynı ölçeğe getirilmiştir. DBN bazlı reaktif bakım algoritması uygulanarak maliyet odaklı yöntemlerin performansları Luvo sistemi üzerinde, planlama ufku boyunca gerçekleşen ortalama toplam bakım maliyetlerine göre, karşılaştırılmış ve en iyileri tespit edilmiştir. Yöntemlerin sağlamlığı birim duruş maliyetine göre duyarlılık analizi yapılarak incelenmiştir.

Maliyet Odaklı Luvo Proaktif Bakım Problemi ve Analizleri: Luvo sisteminde proaktif bakım felsefesi altında planlama ufku boyunca gerçekleşen bakım maliyetini en azlayan bakım stratejilerinin oluşturulması amaçlanmıştır. Sabit aralıklı, dinamik aralıklı ve eşiğe dayalı önleyici ve kestirimci proaktif stratejiler, Luvo sistemi için önerilmiştir. Çok-bileşenli kısmen gözlemlenebilir sistemler için genel bir DBN bazlı proaktif bakım algoritması geliştirilmiştir. Proaktif bakımlarda aynı bileşenin arka arkaya seçilme durumunu engellemek için bir tabu yöntemi yaklaşımı sunulmuştur. Sistem yapısı ve birim duruş maliyeti ile ilgili senaryolar baz alınarak önerilen stratejiler, değişik parametre değerleriyle Luvo sistemi üzerinde simüle edilmiştir. Önerilen proaktif stratejilerin en iyi parametreleri, her senaryoda, planlama ufku boyunca gerçekleşen ortalama toplam bakım maliyetlerinin istatistiksel karşılaştırmaları sonucunda belirlenmiştir. En iyi parametre değerleriyle çalışan üç strateji içinden, en düşük bakım maliyeti ve en düşük bakım sayısı baz alındığında, en iyi performansı olanın güvenilirlik eşiğine dayalı proaktif bakım stratejisi olduğu gözlemlenmiştir. Eşige dayalı bakım, bakım kararları alınırken sistemin gerçek durumunun dikkate alındığı kestirimci bir strateji olduğundan, proaktif bakım yalnızca gerektiğinde uygulanır. Böylece hem bakım maliyetini hem de bakım sayısını düşürebilmektedir.

POMDP Çözücülerinin Karşılaştırma Analizleri: Kısmen gözlemlenebilir Markov karar süreçlerinin çözümünde sıklıkla kullanılan literatürdeki çözücüler araştırılmış ve içlerinden kesin algoritmaları kullanan POMDP-Solve (PS), yaklaşık algoritmaları kullanan SARSOP, yaklaşık çözüm algoritmalarından Symbolic Perseus kullanan Symbolic Perseus-Java (SPJ) ve Symbolic

Perseus-MATLAB (SPM) seçilmiştir. PS ve SARSOP klasik düz POMDP temsili kullanırken SPJ ve SPM faktörlü temsil kullanmaktadır. Seçilen çözücülerin performansını değerlendirebilmek için, artan karmaşıklık düzeylerinde dört bakım problemi için POMDP modeli tasarlanmıştır. POMDP çözücülerini, iki farklı duruş maliyeti baz alınarak elde ettikleri politikaların toplam bakım maliyeti ve çözüm süreleri karşılaştırılarak değerlendirilmiştir. Kesin çözücü olan POMDP-Solve boyutluluk problemine takılıp ikinci modelden sonraki daha karmaşık modelleri çözememiştir. Yaklaşık çözücüler arasında toplam maliyet analizi açısından anlamlı bir fark bulunmamıştır. Faktörlü temsil yapısını kullandığı için çok-bileşenli sistemleri modellemeye daha uygun olduğundan dolayı ve aynı zamanda simülasyon zamanı avantajından dolayı faktörlü POMDP çözücüsü olan SPM'in sonraki çalışmalarda kullanılmasına karar verilmiştir.

DeneySEL bir Sistemin Bakım Problemi için POMDP Modellemesi ve Analizleri:

Bakım eniyilemesi ile ilgili daha önce herhangi bir uygulaması olmadığından faktörlü POMDP çözücülerinin bakım problemleri ile ilgili modelleme ve çözüm kapasitelerini araştırmak üzere gerçek hayattaki çok-bileşenli sistemlerin bakım problemlerinin karmaşıklığını temsil eden deneySEL bir sistem kurgulanmıştır. Her birinin dört durumu ve iki farklı bakım alternatifi bulunan dört-bileşen ve üç süreçten oluşan bu sistem faktörlü POMDP olarak modellenip SPM ile değişik senaryolar altında çözdürülmüş ve yaklaşık bakım politikaları elde edilmiştir. Minör bakım olasılığı, duruş maliyeti ve eylem uzayı ile ilgili duyarlılık analizleri yapılmıştır. Bu analizler sonucunda faktörlü POMDP temsiline ve çözümlerinin çok-bileşenli sistemlerin doğal faktörlü yapısına çok uygun olduğu ve yine modellemede kullandığı modüler faktörlü olasılık ve eylem tanımlamaları sayesinde kapsamlı senaryo analizlerine çok rahat imkan verdiği gösterilmiştir. SPM çözücüsü tarafından elde edilen bakım politikasının performansını karşılaştırmak için bazı proaktif ve reaktif (önceden tanımlı) bakım politikaları tasarlanıp problem üzerinde bileşenlere benzer ve farklı yaşlanma davranışları kurgulanarak simüle edilmiştir. Sonuçlar, önceden tanımlanmış politikaların performansının sistem yapısına bağlı olmasına rağmen, SPM'in her zaman sistem yapısından bağımsız olarak sağlam politikalar verdiğini gösterir. SPM politikasını taklit ederek bir noktaya kadar dışardan verilen politikaların kalitesi geliştirilmeye çalışılabilir. Ancak, bu politika her durumda iyi bir performans vermeyi garanti etmez. Bir başka önemli nokta, önceden tanımlanmış bu tarz politikalarda, zaman ve bileşenlerin bakım kararlarının birbirinden ayrılmasıdır, bu da optimum ortak (joint) bakım kararının bulunmasını engeller.

Tek-hat Luvo Sistemi POMDP Modellemesi ve Analizleri: Paralel iki motor gruplu (iki-hatlı) Luvo sistemi faktörlü POMDP olarak modellenmiş ve SPM çözücüsü ile çözdürülmüştür. Ancak, proje önerisinde de planlandığı üzere, problemin büyüklüğünden dolayı kabul edilebilir bir zamanda anlamlı bir politika elde edilememiştir. O yüzden POMDP'lerle modelleyip

çözdürmek amacıyla Luvo sistemi tek motor grubundan oluşacak şekilde tek-hat Luvo olarak modifiye edilmiştir. Tek-hat Luvo sistemi için faktörlü yapıda POMDP modeli kurulmuş ve değişik senaryolarda SPM ile elde edilen politikalar simüle edilmiştir. SPM politikasının performansının önceden tanımlanmış basit iki reaktif politikanın performansından çok daha iyi olduğu gösterilmiştir. Farklı birim duruş maliyetleri altında SPM politikasının duyarlılık analizi yapılmıştır. Sistemin olasılıklar ve bakım maliyetleri açısından kritik bileşenleri çeşitli analizlerle belirlenmiş, harici değişkenlerin ve gözlem uzayının etkileri farklı senaryolarla tartışılmıştır.

Tek-hat Luvo Sisteminin DBN ve POMDP bazlı Bakım Politikalarının Karşılaştırma Analizleri: Tek-hat Luvo sistemi DBN bazlı reaktif ve proaktif bakım stratejileri ile de çözdürülmüş ve sonuçları SPM politikaları ile farklı birim duruş maliyetleri altında karşılaştırılmıştır. DBN bazlı stratejiler sezgisel olup bakım problemini ayrıştırıp iki seviyede ele almaktadırlar. Ayrıca bakım eylemini seçmek için önerilen bakım yöntemleri de sezgiseldir. Dolayısıyla modifiye tek-hat Luvo sistemi üzerinde faktörlü POMDP ile elde edilen politikalar planlama ufunda daha düşük toplam maliyet vermişlerdir. Ancak şunu da unutmamak gerekir ki, problemin boyutu daha da büyüdüğünde, örneğin orjinal Luvo sisteminin bakım probleminde, POMDP'ler kabul edilebilir zamanda politika oluşturmakta zorlanmışlardır. Diğer taraftan DBN'ler de büyük boyutlu problemlerde çıkarım hesaplamalarında zorlanabilirler, ama çalışmanın sonuçları göstermiştir ki DBN bazlı önerilen stratejiler ve metodlar orjinal Luvo sisteminin bakım probleminde iyi sonuçlar bulabilmişlerdir.

5.1 Katkılar

Proje kapsamında çalışılan problemlerle ilgili geliştirilen model, algoritma ve yöntemlerin literatüre ve bakım yönetimi konusuna katkıları şöyle özetlenebilir

- Bu çalışma ile çok-bileşenli bir gerçek-hayat sistemi olarak termik santrallerdeki Luvo sistemi ele alındığından bakım eniyilemesi literatüründe bir vaka çalışması gerçekleştirilmiştir.
- Termik santrallerdeki Luvo sisteminin bileşenleri arasındaki statik ve zamana bağlı ilişkileri ve bağımlılıkları ifade eden bir DBN modeli geliştirilmiştir. Bu model, referans olarak Luvo veya benzer bir sistemin hata tespiti, güvenilirlik, öngörü ve bakım problemlerinde sonraki çalışmalarda kullanılabilir.
- Çok-bileşenli kısmen gözlemlenebilir sistemler için genel bir DBN bazlı reaktif bakım algoritması geliştirilmiştir.

- Çok-bileşenli kısmen gözlemlenebilir sistemler için genel bir DBN bazlı proaktif bakım algoritması geliştirilmiştir.
- Bir bakım zamanında planlama ufku boyunca toplam bakım sayısını veya toplam bakım maliyetini en azlayacak en uygun bakım eylemini seçmek için değişik verimlilik ölçütleri olan sekiz adet bakım yöntemi önerilmiştir.
- Proaktif bakım stratejilerinde önleyici bakımların sıklığına bağlı olarak daha çok bakım yapıldığından aynı bileşeni arka arkaya seçme durumunun önüne geçebilmek için DBN bazlı proaktif bakım algoritması içinde kullanılmak üzere bir tabu yöntemi yaklaşımı sunulmuştur.
- Önerilen proaktif bakım stratejileri içinde, en düşük bakım maliyeti ve en düşük bakım sayısı baz alındığında, en iyi performansı olanın güvenilirlik eşiğine dayalı proaktif bakım stratejisi olduğu gösterilmiştir.
- POMDP çözücülerinin karşılaştırma analizleri sonucunda ele alınan farklı karmaşık düzeylerdeki sistemlerin bakım problemleri için faktörlü gösterim kullanan yaklaşık POMDP çözücülerinin, SPM ve SPJ, performansı literatürde sıklıkla test edilmiş klasik gösterimli yaklaşık bir çözücüden (SARSOP) performans olarak farklı olmadığı gösterilmiştir.
- Faktörlü POMDP'lerin çok-bileşenli bir sistemin bakım eniyilemesi problemini modellemek ve çözmek için klasik POMDP'lere göre daha uygun olduğu deneysel çok bileşenli bir sistem üzerinden gösterilmiştir. Ayrıca POMDP'lere göre daha etkin senaryo analizine imkan verdiği ve elde edilen bakım politikalarının önceden belirlenmiş politikalara göre daha başarılı olduğu değişik senaryolar kurgulanarak gösterilmiştir.
- Tek-hat Luvo sisteminin durum bazlı bakım problemi faktörlü bir POMDP çözücüsü ile modellenip değişik senaryolar altında yaklaşık bakım politikaları elde edilmiştir. Böylece, faktörlü POMDP'ler ilk defa çok-bileşenli bir gerçek hayat sisteminin bakım eniyilemesi problemini modellemek ve çözmek için kullanılmıştır.

5.2 Çıktılar

Proje kapsamında yayınlanmış eserler Ek A'da sunulmuştur. Projede yapılan çalışmalar sonucunda üç yüksek lisans tezi ortaya çıkmıştır. Çalışmanın DBN ile ilgili olan kısımları projede bursiyer olarak çalışmış iki tane Işık Üniversitesi Endüstri Mühendisliği Bölümü öğrencisinin yüksek lisans tez çalışmalarını oluşturmuştur. Çalışmanın POMDP ile ilgili

olan kısımları ise projede bursiyer olarak çalışmış bir tane Boğaziçi Üniversitesi Endüstri Mühendisliği Bölümü öğrencisinin yüksek lisans tez çalışmasını oluşturmuştur. Elde edilen sonuçlar makale olarak yazılmaktadır. DBN ile ilgili olan çalışmalarımızdan bir tanesi Güvenilirlik alanında en iyi dergilerden biri olan SCI endeksli Reliability Engineering and System Safety dergisinde basılmıştır. Bunun dışında çalışmaları devam eden dört tane taslak halinde makale çalışmamız bulunmaktadır. Ekte taslak makaleler sunulmuştur.

Proje sırasında elde edilen sonuçlar altı farklı konferansta ikisi ulusal sekizi uluslararası olmak üzere toplam on adet bildiri olarak sunulmuştur. Uluslararası bildirilerden beş tanesi konferans bildiri kitapçığında yayınlanmıştır.

5.3 Öneriler

Projede ele alınan konularla ilgili devam edilebilecek çalışmalar için şu öneriler yapılabilir:

- DBN bazlı geliştirilen reaktif ve proaktif bakım stratejileri fırsatçı (opportunistic) bakım felsefesi eklenerek zenginleştirilebilir. Böylece bakım yapılmaya karar verildiği bir zamanda bir bileşen yerine eş zamanlı, bakım süresi ve durumu uygun olan, ilave bileşenlere de bakım yapılarak sonraki yakın zamanlarda yapılacak bakımların duruş maliyetinden kazaç sağlanabilir.
- İlk öneriyle paralel olarak tek-hat Luvo POMDP modeli de uygun olan eylem kombinasyonları belirlenip eylem uzayına eklenerek fırsatçı bakım yapabilecek şekilde revize edilebilir. Ancak unutmamak gerekir ki eylem uzayının büyümesi POMDP modeli üzerinde “geçmiş” problemi yaratacağından kabul edilebilir zamanda kaliteli çözüm bulunamayabilir.
- DBN bazlı reaktif ve proaktif bakımlarda kullanılmak üzere geliştirilen maliyet etkili verimlilik ölçütlerinde maliyet ve olasılık etkilerini dengelemek için çözüm yöntemlerinin performansını artıracak farklı mormalleştirme yöntemleri denenebilir.
- Bakım problemleri denetim (inspection) eylemleri eklenerek zenginleştirilebilir. Böylece daha çok gözlem yapıp sistemden bilgi alınması sağlanabilir.
- Luvo ve tek-hat luvo modelinde bazı bileşenlerin durum uzayları daha çok ara duruma sahip olacak şekilde büyütülebilir. Ancak, unutmamak gerekir ki bu DBN’lerde çıkarım hesaplarında POMDP’lerde de çözüm sırasında zorluk çıkarabilir.

EKLER

A Proje kapsamında yayımlanmış eserler

Proje süresince proje ekibinin şu yayınları hazırlanmıştır:

Yüksek lisans tezleri

- Busenur Türkali, 2020. "Evaluation of Alternative Maintenance Strategies on a Complex System in Thermal Power Systems", Işık Üniversitesi.
- İpek Kıvanç, 2020. "Maintenance Optimization of Multiple Component Systems Using Probabilistic Graphical Models", Boğaziçi Üniversitesi.
- Ayşe Karacaörenli, 2019. "Analysis of Different Maintenance Policies on a Multi-Component System Using Dynamic Bayesian Networks", Işık Üniversitesi.

Uluslararası makaleler

- Özgür Ünlüakın D., Türkali, B., Karacaörenli, A., Aksezer, S. Ç. 2019. "A DBN based reactive maintenance model for a complex system in thermal power plants", Reliability Engineering and System Safety, 190, 106505.
- Özgür-Ünlüakın D., Türkali B., Aksezer Ç. "Cost-effective Fault Diagnosis of a Multi-component Dynamic System under Corrective Maintenance", Taslak Makale.
- Özgür-Ünlüakın D., Türkali B. "Evaluation of proactive maintenance policies on a stochastically dependent hidden multi-component system using DBNs", Taslak makale.
- Kıvanç İ., Özgür-Ünlüakın D. and Bilgiç T. "Maintenance Policy Optimization using Factored POMDPs", Taslak makale.
- Kıvanç İ., Özgür-Ünlüakın D. and Bilgiç T. "Policy Analysis of the Regenerative Air Heater System using Factored POMDPs", Taslak makale.

Uluslararası bildiriler

- Özgür-Ünlüakın D. and Türkali B. “Karmaşık Sistemlerin Bakım Kararlarında Olasılıklı Grafikselle Modellerin Kullanımı”, IX. Uluslararası Bakım Teknolojileri Kongresi ve Sergisi, BTKS 2019. Denizli, Türkiye. 26-28 Eylül 2019 (Sözlü sunum yapıldı, bildiri yayınlandı).
- Kıvanç İ. and Özgür-Ünlüakın D. “An Effective Maintenance Policy for a Multi-component Dynamic System Using Factored POMDPs”, 15th European Conference on Symbolic and Quantitative Approaches to Reasoning with Uncertainty, Belgrad, Sırbistan. 18-21 Eylül 2019 (Sözlü sunum yapıldı, bildiri yayınlandı).
- Özgür-Ünlüakın D., Türkali B., Karacaörenli A. “Comparison Of Various Policies Under Different Maintenance Strategies on a Multi-component System”, International Conference on Structural Safety and Reliability, ICSSR 2019. Barselona, İspanya. 15-16 Ağustos 2019 (Sözlü sunum yapıldı).
- Özgür-Ünlüakın D., Türkali B., Aksezer Ç. “Analyzing the Performance of Different Cost-Based Methods for the Corrective Maintenance of a System in Thermal Power Plants”, International Conference on Structural Safety and Reliability, ICSSR 2019. Barselona, İspanya. 15-16 Ağustos 2019 (Sözlü sunum yapıldı).
- Kıvanç İ. and Özgür-Ünlüakın D. “Maintenance Optimization for a Multi-Component System Using Factored Partially Observable Markov Decision Processes”, International Conference on Structural Safety and Reliability, Barselona, İspanya. 15-16 Ağustos 2019 (Sözlü sunum yapıldı).
- Özgür-Ünlüakın D., Kıvanç İ. “Maintenance Policy Simulation for a Factored Partially Observable System”, International Conference on Structural Safety and Reliability, Berlin, Almanya. 22-24 Temmuz 2019 (Sözlü sunum yapıldı, bildiri yayınlandı).
- Özgür-Ünlüakın D., Kıvanç İ., Türkali B., Aksezer Ç. “A DBN Based Prognosis Model For a Complex Dynamic System: A Case Study in a Thermal Power Plant”, The International Symposium for Production Research, ISPR 2018. Vienna University of Technology, Viyana, Avusturya. 28-31 Ağustos 2018. (Sözlü sunum yapıldı, bildiri yayınlandı).
- Özgür-Ünlüakın D., Karacaörenli A. “Analysis of Reactive Maintenance Strategies on a Multi-Component System using Dynamic Bayesian Networks”, The International Symposium for Production Research, ISPR 2018. Vienna University of Technology, Viyana, Avusturya. 28-31 Ağustos 2018 (Sözlü sunum yapıldı, bildiri yayınlandı).

Ulusal bildiriler

- Özgür-Ünlüakın D., Kıvanç İ., Türkali B., Aksezer Ç. “Karmaşık Sistemlerin Dinamik Bayeşçi Ağlar ile Bakım Modellemesi: Bir Vaka Çalışması”, 38. Yöneylem Araştırması ve Endüstri Mühendisliği Kongresi, YA/EM 2018. Anadolu Üniversitesi, Eskişehir, Türkiye. 26-29 Haziran 2018 (Sözlü sunum yapıldı).
- Özgür-Ünlüakın D., Karacaörenli A. “Çok Bileşenli Bir Sistem Üzerinde Dinamik Bayeşçi Ağlar Kullanarak Farklı Bakım Politikalarının Analizi”, 38. Yöneylem Araştırması ve Endüstri Mühendisliği Kongresi, YA/EM 2018. Anadolu Üniversitesi, Eskişehir, Türkiye. 26-29 Haziran 2018 (Sözlü sunum yapıldı).

B Luvo DBN Modeli Olasılıkları

B.1 Luvo DBN Modeli Başlangıç Olasılıkları

Tablo 75. Rulman başlangıç olasılıkları

Rm B.	Değiştir	Bir Şey Yapma
Normal	1	1
İyi Yataklama Yapmıyor	0	0
Kilitlenmiş	0	0

Tablo 76. Sargı-İzolasyon başlangıç olasılıkları

Sİ B.	Değiştir	Bir Şey Yapma
Orijinal	1	1
Yanmış	0	0

Tablo 77. Mil-Rotor başlangıç olasılıkları

MR B.	Tıraşla	Bir Şey Yapma
Normal	1	1
Eksenli Kayık	0	0

Tablo 78. Redüktör başlangıç olasılıkları

Rd B.	Değiştir	Bir Şey Yapma
Normal	1	1
Arızalı	0	0

Tablo 79. Luvo İzolasyonu başlangıç olasılıkları

Lİ B.	Değiştir		Bir Şey Yapma	
	Temizle	Bir Şey Yapma	Temizle	Bir Şey Yapma
Kaçak Yok.	1	1	1	1
Orta Seviye Kaçak.	0	0	0	0
Yüksek Seviye Kaçak	0	0	0	0

Tablo 80. Petek başlangıç olasılıkları

Pt B.	Temizle	Bir Şey Yapma
Yeni	1	1
Temizlenmiş	0	0
Kirli	0	0

Tablo 81. Kömür kalitesi başlangıç olasılıkları

Uygun	0,5
Uygun Değil	0,5

Tablo 82. Cürüflanma başlangıç olasılıkları

Kömür Kalitesi	Uygun	Uygun Değil
Yok	0,95	0,6
Var	0,05	0,4

B.2 Luvo DBN Modeli Geçiş Olasılıkları

Tablo 83. Rulman geçiş olasılıkları

Rm B.	Değiştir			Bir Şey Yapma		
	Normal	İyi Yataklama Yapmıyor	Kilitlenmış	Normal	İyi Yataklama Yapmıyor	Kilitlenmış
Kendi [t-1]						
Normal	1	1	1	0,99916	0	0
İyi Yataklama Yapmıyor	0	0	0	0,0005	1	0
Kilitlenmış	0	0	0	0,00034	0	1

Tablo 84. Sargı-İzolasyon geçiş olasılıkları

Sİ B.	Değiştir					
Rm [t-1]	Normal		İyi Yataklama Yapmıyor		Kilitlenmiş	
Kendi [t-1]	Orijinal	Yanmış	Orijinal	Yanmış	Orijinal	Yanmış
Orijinal	1	1	1	1	1	1
Yanmış	0	0	0	0	0	0
Sİ B.	Bir Şey Yapma					
Rm [t-1]	Normal		İyi Yataklama Yapmıyor		Kilitlenmiş	
Kendi [t-1]	Orijinal	Yanmış	Orijinal	Yanmış	Orijinal	Yanmış
Orijinal	0,99933	0	0,993	0	0,2	0
Yanmış	0,00067	1	0,007	1	0,8	1

Tablo 85. Mil-Rotor geçiş olasılıkları

MR B.	Tıraşla					
Rm [t-1]	Normal		İyi Yataklama Yapmıyor		Kilitlenmiş	
Kendi [t-1]	Normal	Ekseni Kayık	Normal	Ekseni Kayık	Normal	Ekseni Kayık
Normal	1	1	1	1	1	1
Ekseni Kayık	0	0	0	0	0	0
MR B.	Bir Şey Yapma					
Rm [t-1]	Normal		İyi Yataklama Yapmıyor		Kilitlenmiş	
Kendi [t-1]	Normal	Ekseni Kayık	Normal	Ekseni Kayık	Normal	Ekseni Kayık
Normal	0,99978	0	0,02	0	1	0
Ekseni Kayık	0,00022	1	0,98	1	0	1

Tablo 86. Redüktör geçiş olasılıkları

Rd B.	Değiştir		Bir Şey Yapma	
Kendi [t-1]	Normal	Arızalı	Normal	Arızalı
Normal	1	1	0,99888	0
Arızalı	0	0	0,00112	1

Tablo 87. Luvo İzolasyonu geçiş olasılıkları

Lİ B.	Değiştir					
Rd B.	Temizle			Bir Şey Yapma		
Kendi [t-1]	Kaçak Yok	Orta Seviye Kaçak	Yüksek Seviye Kaçak	Kaçak Yok	Orta Seviye Kaçak	Yüksek Seviye Kaçak
Kaçak Yok	1	1	1	1	1	1
Orta Seviye Kaçak	0	0	0	0	0	0
Yüksek Seviye Kaçak	0	0	0	0	0	0
Lİ B.	Bir Şey Yapma					
Rd B.	Temizle			Bir Şey Yapma		
Kendi [t-1]	Kaçak Yok	Orta Seviye Kaçak	Yüksek Seviye Kaçak	Kaçak Yok	Orta Seviye Kaçak	Yüksek Seviye Kaçak
Kaçak Yok	1	1	1	0,99889	0	0
Orta Seviye Kaçak	0	0	0	0,00078	0,998	0
Yüksek Seviye Kaçak	0	0	0	0,00033	0,002	1

Tablo 88. Petekler geçiş olasılıkları

Pt B.	Değiştir					
Kendi [t-1]	Yeni		Temizlenmiş		Kirli	
Slagging [t-1]	Yok	Var	Yok	Var	Yok	Var
Yeni	0	0	0	0	0	0
Temizlenmiş	1	1	1	1	1	1
Kirli	0	0	0	0	0	0
Rd B.	Bir Şey Yapma					
Kendi [t-1]	Yeni		Temizlenmiş		Kirli	
Cüruflanma [t-1]	Yok	Var	Yok	Var	Yok	Var
Yeni	0,99967	0,99933	0	0	0	0
Temizlenmiş	0	0	0,99944	0,99833	0	0
Kirli	0,00033	0,00067	0,00056	0,00167	1	1

B.3 Luvo DBN Modeli Koşullu Olasılıkları

Tablo 89. Rotor Dönüşü koşullu olasılıkları

MR	Normal					
Si	Orijinal			Yanmış		
BB	Normal	İyi Yataklama Yapmıyor	Kilitlenmiş	Normal	İyi Yataklama Yapmıyor	Kilitlenmiş
Dönüyor	1	0,5	0	0	0	0
Dönmüyor	0	0,5	1	1	1	1
MR	Eksenli Kayık					
Si	Orijinal			Yanmış		
Rm	Normal	İyi Yataklama Yapmıyor	Kilitlenmiş	Normal	İyi Yataklama Yapmıyor	Kilitlenmiş
Dönüyor	0,3	0,1	0	0	0	0
Dönmüyor	0,7	0,9	1	1	1	1

Tablo 90. Redüktör koşullu olasılıkları

Rd	Normal		Arızalı	
Rotor Dönüşü	Dönüyor	Dönmüyor	Dönüyor	Dönmüyor
Dönüyor	1	0	0	0
Dönmüyor	0	1	1	1

Tablo 91. Luvo Dönüşü koşullu olasılıkları

Luvo Dönüşü 2	Dönüyor		Dönmüyor	
Luvo Dönüşü 1	Dönüyor	Dönmüyor	Dönüyor	Dönmüyor
Dönüyor	1	1	1	0
Dönmüyor	0	0	0	1

Tablo 92. Luvo Çıkış Sıcaklığı koşullu olasılıkları

Lİ	Kaçak Yok					
	Yeni		Temizlenmiş		Kirli	
Pt	Dönüyor	Dönmüyor	Dönüyor	Dönmüyor	Dönüyor	Dönmüyor
Luvo Dönüşü	Dönüyor	Dönmüyor	Dönüyor	Dönmüyor	Dönüyor	Dönmüyor
Normal	1	0	1	0	0,99877	0
Düşük	0	0	0	0	0,00067	0
Çok Düşük	0	1	0	1	0,00056	1
Lİ	Orta Seviye Kaçak					
	Yeni		Temizlenmiş		Kirli	
Pt	Dönüyor	Dönmüyor	Dönüyor	Dönmüyor	Dönüyor	Dönmüyor
Luvo Dönüşü	Dönüyor	Dönmüyor	Dönüyor	Dönmüyor	Dönüyor	Dönmüyor
Normal	0,9996	0	0,9992	0	0,96	0
Düşük	0,00032	0	0,00035	0	0,025	0
Çok Düşük	0,00008	1	0,00045	1	0,015	1
Lİ	Yüksek Seviye Kaçak					
	Yeni		Temizlenmiş		Kirli	
Pt	Dönüyor	Dönmüyor	Dönüyor	Dönmüyor	Dönüyor	Dönmüyor
Luvo Dönüşü	Dönüyor	Dönmüyor	Dönüyor	Dönmüyor	Dönüyor	Dönmüyor
Normal	0,0002	0	0,00019	0	0,0014	0
Düşük	0,66	0	0,68	0	0,69	0
Çok Düşük	0,3398	1	0,31981	1	0,3086	1

Tablo 93. Ölçülen Luvo Sıcaklığı koşullu olasılıkları

Luvo Çıkış Sıcaklığı	Normal	Düşük	Çok Düşük
Normal	0,99989	0,00015	0,00005
Düşük	0,0001	0,99	0,0099
Çok Düşük	0,00001	0,00985	0,99005

C Deneysel POMDP Modelinin Olasılıkları

Tablo 94. C1 ve C3'ün geçiş olasılıkları

Eylem	Majör				Minör				Bir şey yapma				
	Kendi [t-1]	W	Yıp1	Yıp2	B	Ç	Yıp1	Yıp2	B	Ç	Yıp1	Yıp2	B
Ç	1	1	1	1	1	0,5	0	0	0,95	0	0	0	0
Yıp1	0	0	0	0	0	0,5	0,5	0	0,04	0,90	0	0	0
Yıp2	0	0	0	0	0	0	0,5	0	0	0,07	0,85	0	0
B	0	0	0	0	0	0	0	1	0,01	0,03	0,15	1	1

Tablo 95. C2 ve C4'ün geçiş olasılıkları

Eylem	Majör				Minör				Bir şey yapma				
	Kendi [t-1]	W	Yıp1	Yıp2	B	Ç	Yıp1	Yıp2	B	Ç	Yıp1	Yıp2	B
Ç	1	1	1	1	1	0,5	0	0	0,97	0	0	0	0
Yıp1	0	0	0	0	0	0,5	0,5	0	0,02	0,92	0	0	0
Yıp2	0	0	0	0	0	0	0,5	0	0	0,06	0,87	0	0
B	0	0	0	0	0	0	0	1	0,01	0,02	0,13	1	1

Tablo 96. P1 ve P2'nin koşullu olasılıkları

C2	Ç				Yıp1				Yıp2				B				
	C1	Ç	Yıp1	Yıp2	B	Ç	Yıp1	Yıp2	B	Ç	Yıp1	Yıp2	B	Ç	Yıp1	Yıp2	B
Ç	1	0,7	0,5	0	0,8	0,5	0,3	0	0,6	0,4	0,1	0	0	0	0	0	0
B	0	0,3	0,5	1	0,2	0,5	0,7	1	0,4	0,6	0,9	1	1	1	1	1	1

Tablo 97. P3'ün koşullu olasılıkları

P2	Ç		B	
	Ç	B	Ç	B
P1	1	0	0	0
B	0	1	1	1

Tablo 98. O1'in koşullu olasılıkları

P3	Ç	B
Yeşil	0,96	0,005
Sarı	0,03	0,015
Kırmızı	0,01	0,98

D Tek-hat Luvo POMDP Modeli Olasılıkları

D.1 Tek-hat Luvo POMDP Modeli Geçiş Olasılıkları

Tablo 99. Rulman geçiş olasılıkları

Rm B.	Değiştir			Bir şey yapma		
	Normal	İyi yataklama yapmıyor	Kilitlenmiş	Normal	İyi yataklama yapmıyor	Kilitlenmiş
Kendi [t-1]						
Normal	1	1	1	0,997503	0	0
İyi yataklama yapmıyor	0	0	0	0,001665	1	0
Kilitlenmiş	0	0	0	0,000832	0	1

Tablo 100. Sargı-İzolasyon geçiş olasılıkları

Sİ B.	Değiştir					
	Normal		İyi Yataklama Yapmıyor		Kilitlenmiş	
Rm [t-1]	Normal	Yanmış	Orijinal	Yanmış	Orijinal	Yanmış
Kendi [t-1]						
Orijinal	1	1	1	1	1	1
Yanmış	0	0	0	0	0	0
Sİ B.	Bir Şey Yapma					
	Normal		İyi Yataklama Yapmıyor		Kilitlenmiş	
Rm [t-1]	Normal	Yanmış	Orijinal	Yanmış	Orijinal	Yanmış
Kendi [t-1]						
Orijinal	0,993356	0	0,2	0	1	0
Yanmış	0,006644	1	0,8	1	0	1

Tablo 101. Mil-Rotor geçiş olasılıkları

MR B.	Tıraşla					
	Normal		İyi Yataklama Yapmıyor		Kilitlenmiş	
Rm	Normal	Ekseni Kayık	Normal	Ekseni Kayık	Normal	Ekseni Kayık
Kendi [t-1]	Normal	Ekseni Kayık	Normal	Ekseni Kayık	Normal	Ekseni Kayık
Normal	1	1	1	1	1	1
Ekseni Kayık	0	0	0	0	0	0
MR B.	Bir Şey Yapma					
Rm	Normal		İyi Yataklama Yapmıyor		Kilitlenmiş	
Kendi [t-1]	Normal	Ekseni Kayık	Normal	Ekseni Kayık	Normal	Ekseni Kayık
Normal	0,999667	0	0,02	0	1	0
Ekseni Kayık	0,000333	1	0,98	1	0	1

Tablo 102. Luvo İzolasyonu geçiş olasılıkları

Lİ B.	Değıştir					
	Temizle			Bir Şey Yapma		
Rd B.	Kaçak Yok	Orta Seviye Kaçak	Yüksek Seviye Kaçak	Kaçak Yok	Orta Seviye Kaçak	Yüksek Seviye Kaçak
Kendi [t-1]	Kaçak Yok	Orta Seviye Kaçak	Yüksek Seviye Kaçak	Kaçak Yok	Orta Seviye Kaçak	Yüksek Seviye Kaçak
Kaçak Yok	1	1	1	1	1	1
Orta Seviye Kaçak	0	0	0	0	0	0
Yüksek Seviye Kaçak	0	0	0	0	0	0
Lİ B.	Bir Şey Yapma					
Rd B.	Temizle			Bir Şey Yapma		
Kendi [t-1]	Kaçak Yok	Orta Seviye Kaçak	Yüksek Seviye Kaçak	Kaçak Yok	Orta Seviye Kaçak	Yüksek Seviye Kaçak
Kaçak Yok	1	1	1	0,997669	0	0
Orta Seviye Kaçak	0	0	0	0,001665	0,996672	0
Yüksek Seviye Kaçak	0	0	0	0,000666	0,003328	1

Tablo 103. Petekler geçiş olasılıkları

Pt B.	Değıştir				Bir şey yapma			
	Temizlenmiş		Kirli		Temizlenmiş		Kirli	
Kendi [t-1]	Hayır	Evet	Hayır	Evet	Hayır	Evet	Hayır	Evet
Cürüflanma [t-1]	Hayır	Evet	Hayır	Evet	Hayır	Evet	Hayır	Evet
Temizlenmiş	1	1	1	1	0,999334	0,996672	0	0
Kirli	0	0	0	0	0,000666	0,003328	1	1

D.2 Tek-hat Luvo POMDP Modeli Koşullu Olasılıkları

Tablo 104. Rotor Dönüşü koşullu olasılıkları

MR	Normal					
Si	Orijinal			Yanmış		
BB	Normal	İyi Yataklama Yapmıyor	Kilitlenmiş	Normal	İyi Yataklama Yapmıyor	Kilitlenmiş
Dönüyor	1	0,5	0	0	0	0
Dönmüyor	0	0,5	1	1	1	1
MR	Ekseni Kayık					
Si	Orijinal			Yanmış		
Rm	Normal	İyi Yataklama Yapmıyor	Kilitlenmiş	Normal	İyi Yataklama Yapmıyor	Kilitlenmiş
Dönüyor	0,3	0,1	0	0	0	0
Dönmüyor	0,7	0,9	1	1	1	1

Tablo 105. Redüktör koşullu olasılıkları

Redüktör Bakımı	Değiştir		Bir şey yapma	
	Normal	Kırılmış	Normal	Kırılmış
Kendi [t-1]				
Normal	1	1	0,998335	0
Kırılmış	0	0	0,001665	1

Tablo 106. Redüktör Dönüşü koşullu olasılıkları

Redüktör	Normal		Dönmüyor	
	Dönüyor	Dönmüyor	Dönüyor	Dönmüyor
Rotor Dönüşü				
Dönüyor	1	0	0	0
Dönmüyor	0	1	1	1

Tablo 107. Luvo Dönüşü koşullu olasılıkları

Redüktör Dönüşü	Dönüyor	Dönmüyor
Dönüyor	1	0
Dönmüyor	0	1

Tablo 108. Cürüflanma koşullu olasılıkları

Kömür kalitesi	İyi	Kötü
Hayır	0.95	0.6
Evet	0.05	0.4

Tablo 109. Luvo Çıkış Sıcaklığı koşullu olasılıkları

Lİ	Kaçak Yok			
Pt	Temizlenmiş		Kirli	
Luvo Dönüşü	Dönüyor	Dönmüyor	Dönüyor	Dönmüyor
Normal	1	0	0,95	0
Düşük	0	0	0,04	0
Çok Düşük	0	1	0,01	1
Lİ	Orta Seviye Kaçak			
Pt	Temizlenmiş		Kirli	
Luvo Dönüşü	Dönüyor	Dönmüyor	Dönüyor	Dönmüyor
Normal	0,99920	0	0,92	0
Düşük	0,00035	0	0,05	0
Çok Düşük	0,0045	1	0,03	1
Lİ	Yüksek Seviye Kaçak			
Pt	Temizlenmiş		Kirli	
Luvo Dönüşü	Dönüyor	Dönmüyor	Dönüyor	Dönmüyor
Normal	0,00019	0	0,0014	0
Düşük	0,68	0	0,69	0
Çok Düşük	0,31981	1	0,3086	1

D.3 Tek-hat Luvo POMDP Modeli Gözlem Olasılıkları

Tablo 110. Luvo Çıkış Performansının gözlem olasılıkları

Luvo Çıkışı Sıcaklığı	Normal	Düşük	Çok Düşük
Normal	0,99989	0,00015	0,00005
Düşük	0,0001	0,99	0,0099
Çok Düşük	0,00001	0,00985	0,99

Tablo 111. Vibrasyonun gözlem olasılıkları

Mil-Rotor	Normal	Ekseni Kayık
N/A	0,99989	0,00015
Düşük	0,0001	0,00985
Çok Düşük	0,00001	0,99

KAYNAKÇA

- [1] AlDurgam, M. and Duffuaa, S. 2013. "Optimal joint maintenance and operation policies to maximise overall systems effectiveness", *International Journal of Production Research*, 51(5), 1319-1330.
- [2] Amin, M. T., Khan F. and Imtiaz S. 2019. "Fault detection and pathway analysis using a dynamic Bayesian network", *Chemical Engineering Science*, 195, 777–790.
- [3] Andrews, J.D. and Dunnett, S. J. 2000. "Event-tree analysis using binary decision diagrams", *IEEE Transactions on Reliability*, 49(2), 230–238.
- [4] Araya-López M., Thomas V., Buffet O. and Charpillet F. 2010. "A closer look at MOMDPs", In *22nd IEEE International Conference on Tools with Artificial Intelligence (ICTAI)*, 2, 197–204.
- [5] Aström, K. J. 1965. "Optimal control of Markov decision processes with incomplete state estimation", *J. Math. Anal. Appl.*, 10, 174–205.
- [6] Aviv, Y. and Pazgal, A. 2005. "A partially observed Markov decision process for dynamic pricing", *Management Science*, 51(9), 1400–1416.
- [7] Bai, H., Hsu, D., Lee, W. S, and Ngo, V. A. 2010. "Monte carlo value iteration for continuous-state POMDPs", In *Algorithmic foundations of robotics IX*, Berlin, Heidelberg: Springer, 175–191.
- [8] Barros, A., Berenguer, C. and Grall, A. 2006. "A maintenance policy for two-unit parallel systems based on imperfect monitoring information", *Reliability Engineering & System Safety*, 91(2), 131–136.
- [9] Barto, A. G., Bradtke, S. J. and Singh, S. P. 1995. "Learning to act using real-time dynamic programming", *Artificial Intelligence*, 72(1-2), 81–138.
- [10] Barua, S., Gao, X., Pasman, H. and Mannan, M. S. 2016. "Bayesian network based dynamic operational risk assessment", *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 41, 399–410.
- [11] BayesFusion. "GeNIe modeler". <https://www.bayesfusion.com/genie-modeler/>. Son Erişim Tarihi: 1 Temmuz 2020.

- [12] Bellman, R. 1957. "A Markovian decision process", *Journal of Mathematics and Mechanics*, 679–684.
- [13] Bellman, R. 1966. "Dynamic programming", *Science*, 153(3731), 34–37.
- [14] Bellman, R. 1954. "The theory of dynamic programming", *Bulletin of the American Mathematical Society*, 60(6), 503–515.
- [15] Bernstein, D. S. 2005. "Complexity analysis and optimal algorithms for decentralized decision making", PhD thesis, Department of Computer Science, University of Massachusetts Amherst, Amherst, MA.
- [16] Boger, J., Poupart, P., Hoey, J., Boutilier, C., Fernie, G., and Mihailidis, A. 2005. "A decision-theoretic approach to task assistance for persons with dementia", In *Proceedings of the IEEE International Joint Conference on Artificial Intelligence*, Edinburgh, 1293–1299.
- [17] Bonet, B. 2002. "An epsilon-optimal grid-based algorithm for partially observable Markov decision processes", In *Proceedings of the Nineteenth International Conference on Machine Learning*, San Francisco, CA, USA, 51–58.
- [18] Bonet, B., Geffner, H. and Labeled R.T.D.P. 2003. "Improving the convergence of real-time dynamic programming", In *International Conference on Automated Planning and Scheduling*, Trento, Italy, 3, 12–21.
- [19] Boutilier, C. and Poole, D. 1996. "Computing optimal policies for partially observable decision processes using compact representations", In *Proceedings of the Thirteenth National Conference on Artificial Intelligence*, 2, 1168–1175.
- [20] Bouvard, K., Artus, S., Bérenguer, C., and Cocquempot, V. 2011. "Condition-based dynamic maintenance operations planning & grouping. Application to commercial heavy vehicles", *Reliability Engineering & System Safety*, 96(6), 601–610.
- [21] International Civil Aviation Organization (ICAO). "BowtieXP Methodology Manual v15". <https://www.icao.int/safety/SafetyManagement/SMI/Documents/Forms/AllItems.aspx>, Son erişim tarihi: 1 Temmuz 2020.
- [22] Brafman, R. I. 1997. "A heuristic variable grid solution method for POMDPs", In *Proceedings of the Fourteenth National Conference on Artificial Intelligence and Ninth Conference on Innovative Applications of Artificial Intelligence*, 727–733.

- [23] Braziunas, D. and Boutilier, C. 2004. "Stochastic local search for POMDP controllers", In In Proc. of the National Conference on Artificial Intelligence, San Jose, CA, 690–696.
- [24] Bryant, R. E. 1992. "Symbolic boolean manipulation with ordered binary-decision diagrams", ACM Computing Surveys (CSUR), 24(3), 293–318.
- [25] Budai, G., Huisman, D. and Dekker, R. 2006. "Scheduling preventive railway maintenance activities", Journal of the Operational Research Society, 57(9), 1035–1044.
- [26] Bui, T. H., Zwiers, J., Poel, M. and Nijholt, A. 2010. "Affective dialogue management using factored POMDPs", Interactive Collaborative Information Systems, 281, 207–236.
- [27] Byon, E., Ntamo, L. and Ding, Y. 2010. "Optimal maintenance strategies for wind turbine systems under stochastic weather conditions", IEEE Transactions on Reliability, 59(2), 393–404.
- [28] Capitán, J., Merino L. and Ollero, A. 2011. "Multi-robot coordinated decision making under mixed observability through decentralized data fusion", In Proceedings of the 11th International Conference on Mobile Robots and Competitions.
- [29] The POMDP Page. "Pomdp-solve [software, version 5.4]". <https://www.pomdp.org/code/>, Son erişim tarihi: 1 Temmuz 2020.
- [30] Cassandra, A. R., Kaelbling, L. P., and Littman, M. 1994. "Acting optimally in partially observable stochastic domains", Technical report, Providence, RI, USA.
- [31] Cassandra, A. R., Kaelbling, L. P., and Kurien, J. A. 1996. "Acting under uncertainty: Discrete Bayesian models for mobile robot navigation", In International Conference on Intelligent Robots and Systems.
- [32] Cassandra, A. R., Littman, M. and Zhang N. 1997. "Incremental pruning: A simple, fast, exact method for partially observable Markov decision processes", In Proceedings of the Thirteenth Annual Conference on Uncertainty in Artificial Intelligence, 54–61.
- [33] Castanier, B., Bérenguer, C. and Grall, A. 2003. "A sequential condition-based repair/replacement policy with non-periodic inspections for a system subject to continuous wear", Applied Stochastic Models in Business and Industry, 19(4), 327–347.
- [34] Chan, K. T., Lee, R. and Burnett, J. 2001. "Maintenance performance: a case study of hospitality engineering systems", Facilities, 19(13/14), 494–504.

- [35] Chang, Y., Wu, X., Zhang, C., Chen, G., Liu, X., Li, J., Cai, B. and Xu, L. 2019. "Dynamic Bayesian networks based approach for risk analysis of subsea wellhead fatigue failure during service life", *Reliability Engineering & System Safety*, 188, 454–462.
- [36] Chen J., Zhong P. A., An, R., Zhu, F. and Xu, B. 2019. "Risk analysis for real-time flood control operation of a multi-reservoir system using a dynamic Bayesian network", *Environmental modelling & software*, 111:409–420.
- [37] Cheng, H. T. 1988. "Algorithms for partially observable Markov decision processes", PhD thesis, University of British Columbia.
- [38] Codetta-Raiteri, D., Bobbio A., Montani, S. and Portinale, L. 2012. "A dynamic Bayesian network based framework to evaluate cascading effects in a power grid", *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 25(4), 683–697.
- [39] Codetta-Raiteri, D. and Portinale, L. 2014. "Dynamic Bayesian networks for fault detection, identification, and recovery in autonomous spacecraft", *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 45(1), 13–24, 2014.
- [40] Corotis, R. B., Ellis, J. H. and Jiang, M. 2005. "Modeling of risk-based inspection, maintenance and life-cycle cost with partially observable Markov decision processes", *Structure and Infrastructure Engineering*, 1(1), 75–84.
- [41] Dabrowski, J. J., Beyers, C. and Villiers, J. P. 2016. "Systemic banking crisis early warning systems using dynamic Bayesian networks", *Expert Systems with Applications*, 62, 225–242.
- [42] Dagum, P. and Galper, A. 1993. "Forecasting sleep apnea with dynamic network models", In *Proc. Ninth Annual Conference on Uncertainty in Artificial Intelligence*, 64–71.
- [43] Dagum, P. and Galper, A. and Horvitz, E. 1992. "Dynamic network models for forecasting", In *Proc. Eighth Annual Conference on Uncertainty in Artificial Intelligence*, pages 41–48.
- [44] Darrell, T. and Pentland, A. 1996. "Active gesture recognition using partially observable Markov decision processes", In the *Proceedings of 13th International Conference on Pattern Recognition*, 3, 984–988.
- [45] David, I., Friedman, L. and Sinuany-Stern, Z. 1999. "A simple suboptimal algorithm for system maintenance under partial observability", *Annals of Operations Research*, 91, 25–40.
- [46] Dean, T., Kaelbling L. P., Kirman, J. and Nicholson, A. 1995. "Planning under time constraints in stochastic domains", *Artificial Intelligence*, 76(1-2), 35–74.

- [47] Degris, T. and Sigaud, O. 2013. "Factored Markov decision processes", *Markov Decision Processes in Artificial Intelligence*, Editörler: Olivier Sigaud, O., Buffet, O., 99–126.
- [48] Dekker, R., Plasmeijer, R. P. and Swart, J. H. 1998. "Evaluation of a new maintenance concept for the preservation of highways", *IMA Journal of Management Mathematics*, 9(2), 109–156.
- [49] Dekker, R., Wildeman, R. E. and Duyn Schouten, F. V. 1997. "A review of multi-component maintenance models with economic dependence", *Mathematical Methods of Operations Research*, 45(3), 411–435.
- [50] Delgado, K. V., Sanner, S. and De Barros, L. N. and Cozman F. G. 2011. "Efficient solutions to factored MDPs with imprecise transition probabilities", *Artificial Intelligence*, 175(9-10), 1498–1527.
- [51] Deodatis, G., Asada, H, and Ito, S. 1996. "Reliability of aircraft structures under non-periodic inspection: a Bayesian approach", *Engineering Fracture Mechanics*, 53(5), 789–805.
- [52] Deodatis, G., Fujimoto, Y., Ito, S., Spencer, J. and Itagaki, H. 1992. "Non-periodic inspection by Bayesian method I", *Probabilistic Engineering Mechanics*, 7(4), 191–204.
- [53] Dibangoye, J., Chaib-draa, B and Mouaddib, A. 2008. "Topological orders based planning for solving POMDPs", In the Proceedings of Twenty-Third Conference on Artificial Intelligence.
- [54] Drake, A. 1962. "Observation of a Markov process through a noisy channel", PhD thesis, Massachusetts Institute of Technology.
- [55] Du, Y., Hsu, D., Huang, X., Kurniawati, H., Sun Lee, W., Ong, S., and Png, S. "Approximate POMDP planning software", <https://bigbird.comp.nus.edu.sg/pmwiki/farm/appl/index.php?n=Main.HomePage>. Son erişim tarihi: 1 Temmuz 2020.
- [56] Egorov, M., Sunberg, Z. N., Balaban, E., Wheeler, T. A., Gupta, J. K. and Kochenderfer, M. J. 2017. "POMDPs.jl: A framework for sequential decision making under uncertainty", *The Journal of Machine Learning Research*, 18(1), 831–835.
- [57] Eisemann, R. C. 1998. "Machinery malfunction diagnosis and correction: Vibration analysis and troubleshooting for process industries", Michigan Üniversitesi: Prentice Hall PTR.
- [58] Ellis, H., Jiang, M. and Corotis, R. B. 1995. "Inspection, maintenance, and repair with partial observability", *Journal of Infrastructure Systems*, 1(2), 92–99.

- [59] Emilie M. D., Baptiste, J., Rotshtein, P. and Russell, M. 2015. "POMDP based action planning and human error detection", In International Conference on Artificial Intelligence Applications and Innovations, 250–265.
- [60] Englund, S. and Sørensen, J. D. 1998. "A probabilistic model for chloride-ingress and initiation of corrosion in reinforced concrete structures", *Structural safety*, 20(1), 69–89, 1998.
- [61] Erdogdu, U., Alhajj, R. and Polat, F. 2011. "The benefit of decomposing POMDP for control of gene regulatory networks", In the Proceedings of the 2011 IEEE/WIC/ACM International Conferences on Web Intelligence and Intelligent Agent Technology, 2, 381–385.
- [62] Feng, Z. and Hansen, E. A. 2002. "Symbolic heuristic search for factored Markov decision processes", In the Proceedings of the 18th National Conference on Artificial Intelligence, 455–460.
- [63] Foka, A. and Trahanias, P. 2007. "Real-time hierarchical POMDPs for autonomous robot navigation", *Robotics and Autonomous Systems*, 55(7), 561–571.
- [64] Games, P. A. and Howell J. F. 1976. "Pairwise multiple comparison procedures with unequal n's and/or variances: a Monte Carlo study", *Journal of Educational Statistics*, 1(2), 113–125.
- [65] Gendreau, M., and Potvin, J. Y. 2010. *Handbook of Metaheuristics* (2. Basım). New York: Springer
- [66] Ghandali, R., Abooi, M. H. and Fallahnezhad, M. S. 2018. "A POMDP framework to find optimal policy in sustainable maintenance", *Scientia Iranica*, 2018.
- [67] Ghosh, M. N and Sharma, D. 1963. "Power of Tukey's test for non-additivity", *Journal of the Royal Statistical Society. Series B (Methodological)*, 25(1), 213–219.
- [68] Goulionis, J.E. and Vozikis, A. 2009. "Medical decision making for patients with Parkinson disease under average cost criterion", *Australia and New Zealand health policy*, 6(1), 1–8.
- [69] Grady, D. K., Moll, D. K. and Kavradi, L. E. 2015. "Extending the applicability of POMDP solutions to robotic tasks", *IEEE Transactions on Robotics*, 31(4), 948–961.
- [70] Grigoriev A., Van De Klundert, J. and Spieksma, F. 2006. "Modeling and solving the periodic maintenance problem", *European Journal of Operational Research*, 172(3), 783–797.
- [71] Gustavsson, E., Patriksson, M., Strömberg, A., Wojciechowski, A. and Önnheim, M. 2014. "Preventive maintenance scheduling of multi-component systems with interval costs", *Computers & Industrial Engineering*, 76, 390–400.

- [72] Hansen, E. A. 1998. "An improved policy iteration algorithm for partially observable MDPs", In *Advances in Neural Information Processing Systems*, 1015–1021.
- [73] Hansen, E. A. 1998. "Solving POMDPs by searching in policy space", In *Proceedings of the Fourteenth conference on Uncertainty in artificial intelligence*, 211–219.
- [74] Hansen, E. A. and Feng, Z. 2000. "Dynamic programming for POMDPs using a factored state representation", In *Proceedings of the 5th International Conference on Artificial Intelligence Planning and Scheduling*, 130–139.
- [75] Hauskrecht, M. and Fraser, H. 2000. "Planning treatment of ischemic heart disease with partially observable Markov decision processes", *Artificial Intelligence in Medicine*, 18(3), 221–244.
- [76] Heckerman, D., Breese, J. and Rommelse, K. 1994. "Troubleshooting under uncertainty", Technical Report MSR-TR-94-07, Microsoft Research.
- [77] Higgins, A. 1998. "Scheduling of railway track maintenance activities and crews", *Journal of the Operational Research Society*, 49(10), 1026–1033.
- [78] Hipkin, T. and De Cock, C. 2000. "TQM and BPR: lessons for maintenance management", *Omega*, 28(3), 277–292.
- [79] Hoey, J. "Symbolic Perseus (In Java)". <https://cs.uwaterloo.ca/jhoey/research/spudd/index.php>. Son Erişim Tarihi: 1 Temmuz 2020.
- [80] Hoey, J. and Grzes, M. 2011. "Distributed control of situated assistance in large domains with many tasks", In *Twenty-first international conference on automated planning and scheduling*.
- [81] Hoey, J. and Little J. J. 2007. "Value-directed human behavior analysis from video using partially observable Markov decision processes", *IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence*, 29(7), 1118–1132.
- [82] Hoey, J., Poupart P., Bertoldi, A., Craig, T. and Boutilier, C. and Mihailidis, A. 2010. "Automated handwashing assistance for persons with dementia using video and a partially observable Markov decision process", *Computer Vision and Image Understanding*, 114(5), 503–519.
- [83] Hoey, J., Poupart P., Bertoldi, A. and Mihailidis, A. 2007. "Assisting persons with dementia during handwashing using a partially observable Markov decision process", In *Proc. Int. Conf. on Vision Systems*, 65.

- [84] Hoey, J., Poupart P., Boutilier, C. and Mihailidis, A. 2014. "POMDP models for assistive technology", *Assistive Technologies: Concepts, Methodologies, Tools, and Applications*, 120–140. IGI Global.
- [85] Hoey, J., Poupart P., St-Aubin, R., Hu, A., and Boutilier, C. 1999. "SPUDD: Stochastic planning using decision diagrams", *Proceedings of the Fifteenth conference on Uncertainty in artificial intelligence*, 279–288.
- [86] Hong, H. P., Zhou, W., Zhang, S. and Ye, W. 2014. "Optimal condition-based maintenance decisions for systems with dependent stochastic degradation of components", *Reliability Engineering & System Safety*, 121, 276–288.
- [87] Howard, R. A. 1960. "Dynamic Programming and Markov Processes", MIT Press, Cambridge, MA.
- [88] Hu, J., Zhang, L., Cai, Z. and Wang, Y. 2015a. "An intelligent fault diagnosis system for process plant using a functional HAZOP and DBN integrated methodology", *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 45, 119–135.
- [89] Hu, J., Zhang, L., Cai, Z., Wang, Y. and Wang, A. 2015b. "Fault propagation behavior study and root cause reasoning with dynamic Bayesian network based framework", *Process Safety and Environmental Protection*, 97, 25–36.
- [90] Hu, J., Zhang, L., and Liang, W. 2012. "Opportunistic predictive maintenance for complex multi-component systems based on DBN-HAZOP model", *Process Safety and Environmental Protection*, 90(5), 376–388.
- [91] Hu, J., Zhang, L., Ma, L. and Wang, A. 2011. "An integrated safety prognosis model for complex system based on dynamic Bayesian network and ant colony algorithm", *Expert Systems with Applications*, 38(3), 1431–1446.
- [92] Hu, J., Zhang, L., Tian, W. and Zhou, S. 2017. "DBN based failure prognosis method considering the response of protective layers for the complex industrial systems", *Engineering Failure Analysis*, 79, 504–519.
- [93] Huynh, K., Castro, I. T., Barros, A. and Bérenguer, C. 2012. "Modeling age-based maintenance strategies with minimal repairs for systems subject to competing failure modes due to degradation and shocks", *European journal of operational research*, 218(1), 140–151.

- [94] Ibrahim, R., Kucukyazici, B., Verter, V., Gendreau, M. and Blostein, M. 2016. "Designing personalized treatment: An application to anticoagulation therapy", *Production and Operations Management*, 25(5), 902–918.
- [95] Ito, S., Deodatis, G., Fujimoto, Y., Asada, H. and Shinozuka, M. 1992. "Non-periodic inspection by Bayesian method II: structures with elements subjected to different stress levels", *Probabilistic Engineering Mechanics*, 7(4), 205–215, 1992.
- [96] Ivy, J. and Nembhard, H. 2005. "A modeling approach to maintenance decisions using statistical quality control and optimization", *Quality and Reliability Engineering International*, 21(4), 355–366
- [97] Jakob, M. and Moler, Z. 2013. "Modular framework for simulation modelling of interaction-rich transport systems", In *16th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems*, 2152–2159.
- [98] Jhang, J. P. and Sheu, S. H. 2000. "Optimal age and block replacement policies for a multi-component system with failure interaction", *International Journal of Systems Science*, 31(5), 593–603.
- [99] Jiang, M., Corotis, R. B. and Ellis, J. H. 2000. "Optimal life-cycle costing with partial observability", *Journal of infrastructure systems*, 6(2), 56–66.
- [100] Kaelbling, L. P., Littman, M. L. and Cassandra, A. R. 1998. "Planning and acting in partially observable stochastic domains", *Artificial intelligence*, 101(1-2), 99–134.
- [101] Kao, H. Y., Huang, C. H. and Li, H. L. 2005. "Supply chain diagnostics with dynamic Bayesian networks", *Computers & Industrial Engineering*, 49(2), 339–347.
- [102] Karkus, P., Hsu, D. and Lee, W. S. 2017. "Qmdp-net: Deep learning for planning under partial observability", In *Advances in Neural Information Processing Systems*, 4694–4704.
- [103] Keller, W. and Modarres, M. 2005. "A historical overview of probabilistic risk assessment development and its use in the nuclear power industry: a tribute to the late Professor Norman Carl Rasmussen", *Reliability Engineering & System Safety*, 89(3), 271–285.
- [104] Kim, D., Sim, H. S., Kim, K. E., Kim, J., Kim, H. and Sung, J. W. 2008. "Effects of user modeling on POMDP-based dialogue systems", In *9th Annual Conference of the International Speech Communication Association*, 1169–1172.

- [105] Kim, J. W., Choi, G. B. and Lee, J. M. 2018. "A POMDP framework for integrated scheduling of infrastructure maintenance and inspection", *Computers & Chemical Engineering*, 112, 239–252.
- [106] Kivanç, İ. and Özgür-Ünlüakın, D. 2019. "An effective maintenance policy for a multi-component dynamic system using factored POMDPs", In *European Conference on Symbolic and Quantitative Approaches with Uncertainty*, 290–300.
- [107] Kobbacy, K. A. and Murthy, D. P. 2008. "Complex system maintenance handbook", Springer Science & Business Media.
- [108] Koltunova, V. 2013. "Active sensing for partially observable Markov decision processes", Master's thesis, University of Waterloo.
- [109] Kothamasu, R., Huang S. H. and VerDuin, W. H. 2006. "System health monitoring and prognostics—a review of current paradigms and practices", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 28(9-10), 1012–1024.
- [110] Kurniawati, H., Hsu, D. and Lee, W. S. 2008. "SARSOP: Efficient point-based POMDP planning by approximating optimally reachable belief spaces", In *Proc. Robotics: Science and Systems*.
- [111] Lai M. T. and Chen, Y. C. 2006. "Optimal periodic replacement policy for a two-unit system with failure rate interaction", *The international journal of advanced manufacturing technology*, 29(3-4), 367–371.
- [112] Langseth, H. and Portinale, L. 2007. "Bayesian networks in reliability", *Reliability Engineering & System Safety*, 92(1), 92–108.
- [113] Li, M. and Liu, K. 2018. "Application of intelligent dynamic Bayesian network with wavelet analysis for probabilistic prediction of storm track intensity index", *Atmosphere*, 9(6), 224.
- [114] Li, Z., Xu T., Gu, J., Dong, Q. and Fu, L. 2018. "Reliability modelling and analysis of a multi-state element based on a dynamic Bayesian network", *Royal Society open science*, 5(4), 171438.
- [115] Li, Z., Xu T., Gu, J., Wang, H. and Zhao, J. 2019. "Reliability modeling of redundant systems considering CCF based on DBN", *Arabian Journal for Science and Engineering*, 44(3), 2567–2577.

- [116] Lin, S., Zhang, A. and Feng, D. 2016. "Maintenance decision-making model based on POMDP for traction power supply equipment and its application", In Prognostics and System Health Management Conference, 1–6.
- [117] Lin, T. W. and Wang, C. H. 2011. "Minimisation of non-periodic preventive maintenance cost in series-parallel systems", Defence Science Journal, 61(1), 44–50.
- [118] Littman, M. L. 1994. "The witness algorithm: Solving partially observable Markov decision processes", Technical Report CS-94-40, Brown University, Providence, RI, 1994.
- [119] Littman, M. L., Cassandra, A. R. and Kaelbling, L. P. 1995a. "Efficient dynamic-programming updates in partially observable Markov decision processes", Technical Report CS-95-19, Brown University. Providence. RI.
- [120] Littman, M. L., Cassandra, A. R. and Kaelbling, L. P. 1995b. "Learning policies for partially observable environments: Scaling up", In Machine Learning Proceedings, 362–370.
- [121] Littman, M. L., 1996. "Algorithms for sequential decision making", Ph.D. Thesis, Brown University Providence, RI.
- [122] Liu, Z., Liu, Y., Cai, B., Zhang, D. and Zheng, C. 2015. "Dynamic Bayesian network modeling of reliability of subsea blowout preventer stack in presence of common cause failures", Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 38, 58–66.
- [123] Lovejoy, W. S. 1991. "A survey of algorithmic methods for partially observed Markov decision processes", Annals of Operations Research, 28(1), 47–65.
- [124] Lusena, C., Goldsmith, J. and Mundhenk, M. 2001. "Nonapproximability results for partially observable Markov decision processes", Journal of artificial intelligence research, 14, 83-103.
- [125] Ma, S., Liu, Q. and Sun, X. 2003. "Research on emergency maintenance technique of equipments [J]", China Surface Engineering, 3, 7–16.
- [126] Madanat, S. 1993. "Incorporating inspection decisions in pavement management", Transportation Research Part B: Methodological, 27(6), 425–438.
- [127] Madanat, S. and Ben-Akiva, M. 1994. "Optimal inspection and repair policies for infrastructure facilities", Transportation science, 28(1), 55–62.
- [128] Madani, O., Hanks, S. and Condon, A. 1999. "On the undecidability of probabilistic planning and infinite-horizon partially observable markov decision problems", In Proceedings of the Sixteenth National Conference on Artificial Intelligence, Menlo Park, CA, USA, 541–548.

- [129] Maillart, L. S., Ivy, L. S., Ransom, S. and Diehl, K. 2008. "Assessing dynamic breast cancer screening policies", *Operations Research*, 56(6), 1411–1427.
- [130] Makis, V. and Jiang, X. 2003. "Optimal replacement under partial observations", *Mathematics of Operations Research*, 28(2), 382–394.
- [131] Marini, S., Trifoglio, E., Barbarini, N., Sambo, F., Di Camillo, B., Malovini, A., Manfrini, M., Cobelli, C. and Bellazzi, R. 2015. "A dynamic Bayesian network model for long-term simulation of clinical complications in type 1 diabetes", *Journal of Biomedical Informatics*, 57, 369–376, 2015.
- [132] Mazidi, P., Mian, D. and Sanz-Bobi, M. A. 2016. "Simulation model based on reliability and maintenance of a component and their effect on cost", In *China International Conference on Electricity Distribution*, 1–5.
- [133] McCallum, R. A. 1995. "Instance-based utile distinctions for reinforcement learning with hidden state", In *Machine Learning Proceedings*, 387–395.
- [134] Mehta, B.R. and Reddy, Y.J. 2015. "Chapter 18 - System Maintenance", *Industrial Process Automation Systems*, Editörler: Mehta, B.R. and Reddy, Y.J., 523 – 545. Butterworth-Heinemann.
- [135] Memarzadeh, M. and Papakonstantinou, K. 2017. "Optimal maintenance and inspection planning for structural components under mixed and partial observability", In *12th Int. Conf. on Structural Safety and Reliability*, 2280-2289.
- [136] Memarzadeh, M. and Pozzi, M. 2016. "Integrated inspection scheduling and maintenance planning for infrastructure systems", *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 31(6), 403–415.
- [137] Memarzadeh, M., Pozzi, M. and Colter, J. 2014. "Optimal planning and learning in uncertain environments for the management of wind farms", *Journal of Computing in Civil Engineering*, 29(5), 04014076.
- [138] Mihailidis, A., Boger, J., Craig, T. and Hoey, J. 2008. "The COACH prompting system to assist older adults with dementia through handwashing: An efficacy study", *BMC geriatrics*, 8(1), 28–46.
- [139] Monahan, G. 1982. "State of the art—a survey of partially observable Markov decision processes: theory, models, and algorithms", *Management Science*, 28(1), 1–16.

- [140] Morato, P. G., Mai, Q., Rigo, P. and Nielsen, J. S. 2018. "Point-based POMDP risk based inspection of offshore wind substructures", In Proceedings of the Sixth International Symposium on Life-cycle Civil Engineering.
- [141] Moubray, J. 2001. "Reliability-centered maintenance", New York, Industrial Press.
- [142] Muller, A., Suhner, M. C. and lung, B. 2008. "Formalisation of a new prognosis model for supporting proactive maintenance implementation on industrial system", Reliability Engineering & System Safety, 93(2), 234–253.
- [143] Murphy, K. P. 2001. "Bayes net toolbox for matlab", <https://www.cs.utah.edu/tch/notes/matlab/bnt/docs/bnt?pre?sf.html>.
- [144] Murphy, K. P. and Russell, S. 2002. "Dynamic Bayesian networks: representation, inference and learning", University of California, Berkeley, CA.
- [145] Murthy, D. and Nguyen, D. 1985. "Study of a multi-component system with failure interaction", European Journal of Operational Research, 21(3), 330–338.
- [146] Nguyen, K. A., Do, P. and Grall, A. 2014. "Condition-based maintenance for multi-component systems using importance measure and predictive information", International Journal of Systems Science: Operations & Logistics, 1(4), 228–245.
- [147] Nguyen, K. A., Do, P. and Grall, A. 2015. "Multi-level predictive maintenance for multi-component systems", Reliability engineering & system safety, 144, 83–94.
- [148] Nicol, S., Buffet, O., Iwamura, T. and Chadès, I. 2013. "Adaptive management of migratory birds under sea level rise", In Twenty-Third International Joint Conference on Artificial Intelligence.
- [149] Nicolai, R. P. and Dekker, R. 2008. Sayfa 263–286. "Optimal maintenance of multi-component systems: a review". Complex system maintenance handbook, Editörler: Kobbacy, K. and Murthy, D. N. London: Springer.
- [150] Nielsen, J. S. and Sørensen, J. D. 2018. "Computational framework for risk-based planning of inspections, maintenance and condition monitoring using discrete Bayesian networks", Structure and Infrastructure Engineering, 14(8), 1082–1094.
- [151] Oliehoek, F. and Spaan, M. 2009. "MADP toolbox 0.2", Technical report, Technical Report, Informatics Institute, Amsterdam University.

- [152] Özgür-Ünlüakin, D. and Bilgiç, T. 2014. "Replacement policies for a complex system with unobservable components using dynamic Bayesian networks", *International Journal of Computational Intelligence Systems*, 7(sup1), 68–83.
- [153] Özgür-Ünlüakin, D. and Karacaörenli, A. 2018. "Analysis of reactive maintenance strategies on a multi-component system using dynamic Bayesian networks", In *The International Symposium for Production Research*, 101–110.
- [154] Özgür-Ünlüakin, D. and Kivanç, İ. 2019. "Maintenance policy simulation for a factored partially observable system", In *Proceedings of the 2019 Summer Simulation Conference*.
- [155] Özgür-Ünlüakin, D. and Kivanç, İ., Türkali, B. and Aksezer, Ç. 2018. "A DBN based prognosis model for a complex dynamic system: A case study in a thermal power plant", In *The International Symposium for Production Research*, 75–84.
- [156] Özgür-Ünlüakin, D., Türkali, B., Karacaörenli, A. and Aksezer, Ç. 2019. "A DBN based reactive maintenance model for a complex system in thermal power plants", *Reliability Engineering & System Safety*, 190, 106505.
- [157] Pajarinen, J., Peltonen, J., Hottinen, A. and Uusitalo, M. A. 2010. "Efficient planning in large POMDPs through policy graph based factorized approximations", In *Joint European Conference on Machine Learning and Knowledge Discovery in Databases*, 1–16.
- [158] Papadakis, I. and Kleindorfer, P. R. 2005. "Optimizing infrastructure network maintenance when benefits are interdependent", *OR Spectrum*, 27(1), 63–84.
- [159] Papadimitriou, C. and Tsitsiklis, J. N. 1987. "The complexity of Markov decision processes", *Math. Oper. Res.*, 12(3), 441–450.
- [160] Papakonstantinou, K. G., Andriotis, C. P. and Shinozuka, M. 2016a. "Point-based POMDP solvers for lifecycle cost minimization of deteriorating structures", In *Proceedings of the 5th International Symposium on Life-Cycle Civil Engineering*.
- [161] Papakonstantinou, K. G., Andriotis, C. P. and Shinozuka, M. 2016b. "POMP solutions for monitored structures", In *Proc. of IFIP WG-7.5 Conference on Reliability and Optimization of Structural Systems*.
- [162] Papakonstantinou, K. G., Andriotis, C. P. and Shinozuka, M. 2018. "POMDP and MOMDP solutions for structural life-cycle cost minimization under partial and mixed observability", *Structure and Infrastructure Engineering*, 14(7), 869–882.

- [163] Papakonstantinou, K. G. and Shinozuka, M. 2014a. "Planning structural inspection and maintenance policies via dynamic programming and Markov processes. part I: Theory", *Reliability Engineering & System Safety*, 130, 202–213, 2014.
- [164] Papakonstantinou, K. G. and Shinozuka, M. 2014b. "Planning structural inspection and maintenance policies via dynamic programming and Markov processes. part II: POMDP implementation", *Reliability Engineering & System Safety*, 130, 214–224.
- [165] Papakonstantinou, K. G. and Shinozuka, M. 2014c. "Optimum inspection and maintenance policies for corroded structures using partially observable Markov decision processes and stochastic, physically based models", *Probabilistic Engineering Mechanics*, 37, 93–108.
- [166] Pearl, J. 1985. "Bayesian networks: A model of self-activated memory for evidential reasoning", In *Proceedings of the 7th Conference of the Cognitive Science Society*, University of California, Irvine, CA, USA, 15–17.
- [167] Pearl, J. 2014. "Probabilistic reasoning in intelligent systems: Networks of plausible inference, Elsevier.
- [168] Pham, H. and Wang, H. 1996. "Imperfect maintenance", *European journal of operational research*, 94(3), 425–438.
- [169] Pineau, J., Gordon, G., Thrun, S. 2003. "Point-based value iteration: An anytime algorithm for POMDPs", In *Proc. Int. Jnt. Conf. on Artificial Intelligence*, 3, 477–484.
- [170] Pineau, J., Gordon, G. and Thrun, S. 2004. "Tractable planning under uncertainty: exploiting structure", PhD thesis, Carnegie Mellon University, the Robotics Institute.
- [171] Pineau, J. and Gordon, G. 2007. "POMDP planning for robust robot control", In *Robotics Research*, 69–82.
- [172] Poole, D. and Mackworth, A. K. 2010. "Artificial intelligence - Foundations of computational agents".
- [173] Poupart, P. 2005. "Exploiting structure to efficiently solve large scale partially observable Markov decision processes", PhD thesis, Toronto, Ont., Canada.
- [174] Poupart, P. "Symbolic Perseus". <https://cs.uwaterloo.ca/ppoupart/software.html>. Son Erişim Tarihi: 1 Temmuz 2020.

- [175] POWER Magazine. “Air Preheater Seal Upgrades Renew Plant Efficiency”. <https://www.powermag.com/air-preheater-seal-upgrades-renew-plant-efficiency/>, Son erişim tarihi: 1 Temmuz 2020.
- [176] Prajapati, A., Bechtel, J. and Ganesan, S. 2012. “Condition based maintenance: a survey”, *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 18(4), 384–400.
- [177] Price, J. W. H. and Mathew, J. 2000. “The constant-interval replacement model for preventive maintenance”, *International Journal of Quality & Reliability Management*, 17(8), 822–838.
- [178] Puterman, M. L. 2014. “Markov decision processes: Discrete stochastic dynamic programming”, John Wiley & Sons.
- [179] Ram, M. 2019. “Reliability Engineering: Methods and Applications”, CRC Press.
- [180] Reyes, A., Spaan, M. and Sucar, L. E. 2009. “An intelligent assistant for power plants based on factored MDPs”, In 15th International Conference on Intelligent System Applications to Power Systems, 1–6.
- [181] Roos, J., Gavin G. and Bonnevey, S. 2017. “A dynamic Bayesian network approach to forecast short-term urban rail passenger flows with incomplete data”, *Transportation Research Procedia*, 26, 53–61.
- [182] Rosenfield, D. 1976. “Markovian deterioration with uncertain information”, *Operations Research*, 24(1), 141–155.
- [183] Ross, S. and Chaib-Draa, B. 2007. “AEMS: An anytime online search algorithm for approximate policy refinement in large POMDPs”, In Proceedings of the 20th International Joint Conference on Artificial Intelligence, 2592–2598.
- [184] Ross, S., Pineau, J., Paquet, S. and Chaib-Draa, B. 2008. “Online planning algorithms for POMDP”, *Journal of Artificial Intelligence Research*, 32, 663–704.
- [185] Rout, T. M. Moore, J. L. and McCarthy, M. A. 2014. “Prevent, search or destroy a partially observable model for invasive species management”, *Journal of Applied Ecology*, 51(3), 804–813.
- [186] Roy, N., Gordon, G. and Thrun, S. 2005. “Finding approximate POMDP solutions through belief compression”, *Journal of Artificial Intelligence Research*, 23, 1–40.

- [187] Rusmevichientong, P. and Van Roy, B. 2001. "An analysis of belief propagation on the turbo decoding graph with gaussian densities", *IEEE Transactions on Information Theory*, 47(2), 745–765.
- [188] Salazar, J. C., Weber, P., Nejari, F., Sarrate, R. and Theilliol, D. 2017. "System reliability aware model predictive control framework", *Reliability Engineering & System Safety*, 167, 663–672.
- [189] Sandri, M., Berchialla, P., Baldi, I., Gregori, D. and De Blasi, R. A. 2014. "Dynamic Bayesian networks to predict sequences of organ failures in patients admitted to ICU", *Journal of Biomedical Informatics*, 48, 106–113.
- [190] Sasieni, M. W. 1956. "A Markov chain process in industrial replacement", *Journal of the Operational Research Society*, 7(4), 148–155.
- [191] Satow, T. and Osaki, S. 2003. "Optimal replacement policies for a two-unit system with shock damage interaction", *Computers & Mathematics with Applications*, 46(7), 1129–1138.
- [192] Scarf, P. A. and Deara, M. 1998. "On the development and application of maintenance policies for a two-component system with failure dependence", *IMA Journal of Management Mathematics*, 9(2), 91–107.
- [193] Scarf, P. A. and Deara, M. 2003. "Block replacement policies for a two-component system with failure dependence", *Naval Research Logistics (NRL)*, 50(1), 70–87.
- [194] Shafiee, M. and Finkelstein, M. 2015. "An optimal age-based group maintenance policy for multi-unit degrading systems", *Reliability Engineering & System Safety*, 134, 230–238.
- [195] Shani, G., Pineau, J. and Kaplow, R. 2013. "A survey of point-based POMDP solvers", *Autonomous Agents and Multi-Agent Systems*, 27(1), 1–51.
- [196] SharFriedmanma, A., Yadava, G. S. and Deshmukh, S. G. 2011. "A literature review and future perspectives on maintenance optimization", *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 17(1), 5–25.
- [197] Sheu, S. H. and Liou, C. T. 1992. "Optimal replacement of a k-out-of-n system subject to shocks", *Microelectronics Reliability*, 32(5), 649–655.
- [198] Sheut, C. and Krajewski, L. J. 1994. "A decision model for corrective maintenance management", *The International Journal of Production Research*, 32(6), 1365–1382.

- [199] Sigaud, O. and Buffet, O. 2013. "Markov decision processes in artificial intelligence", John Wiley & Sons.
- [200] Silver, D. and Veness, J. 2010. "Monte-carlo planning in large POMDPs", In Advances in neural information processing systems, 2164–2172.
- [201] Simmons, R. and Koenig, S. 1995. "Probabilistic robot navigation in partially observable environments", In IJCAI, 95, 1080–1087.
- [202] Smallwood, R. D. and Sondik, E. J. 1973. "The optimal control of partially observable Markov decision processes over a finite horizon", Operations Research, 21(5), 1071–1088.
- [203] Smith, M. A. J., and Dekker, R. 1997. "Preventive maintenance in a 1-out-of-n system: the uptime, downtime and costs", European Journal of Operational Research, 565-583.
- [204] Smith, T. "ZMDP software for POMDP and MDP planning". GitHub. <https://github.com/trey0/zmdp>, Son erişim tarihi: 1 Temmuz 2020.
- [205] Smith, T. and Simmons, R. 2004. "Heuristic search value iteration for POMDPs", In Proceedings of the 20th Conference on Uncertainty in Artificial Intelligence, Arlington, Virginia, United States, 520–527.
- [206] Smith, T. and Simmons, R. 2006. "Focused real-time dynamic programming for MDPs: Squeezing more out of a heuristic", In AAAI, 1227–1232.
- [207] Smith, T. and Simmons, R. 2005. "Point-based POMDP algorithms: Improved analysis and implementation", In Proc. of Uncertainty in Artificial Intelligence, 542–547.
- [208] Somani, A., Ye, N., Hsu, D. and Lee, W. S. 2013. "Despot: Online POMDP planning with regularization", In Advances in neural information processing systems, 1772–1780.
- [209] Sondik, E. J. 1978. "The optimal control of partially observable Markov processes over the infinite horizon: Discounted costs", Oper. Res., 26(2), 282–304.
- [210] Sondik, E. J. 1971. "The optimal control of partially observable Markov processes", Technical report, Stanford Univ Calif Stanford Electronics Labs.
- [211] Spaan, M., Veiga, T. S. and Lima, P. 2010. "Active cooperative perception in network robot systems using POMDPs", In International Conference on Intelligent Robots and Systems, 4800–4805.

- [212] Spaan, M. and Vlassis, N. 2005. "Perseus: Randomized point-based value iteration for POMDPs", *Journal of Artificial Intelligence Research*, 24, 195–220.
- [213] Sriskandarajah, C., Jardine, A. K. S. and Chan, C. K. 1998. "Maintenance scheduling of rolling stock using a genetic algorithm", *Journal of the Operational Research Society*, 49(11), 1130–1145.
- [214] St-Aubin, R., Hoey, J. and Boutilier, C. 2001. "APRICODD: Approximate policy construction using decision diagrams", In *Advances in Neural Information Processing Systems*, 1089–1095.
- [215] Taha, T., Miró, J. V. and Dissanayake, G. 2011. "A POMDP framework for modelling human interaction with assistive robots", In *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pages 544–549.
- [216] Tahara, A and Nishida, T. 1975. "Optimal replacement policy for minimal repair model", *Journal of Operations Research Society of Japan*, 18(3–4), 113–124.
- [217] Theocharous, G. and Mahadevan, S. 2002. "Approximate planning with hierarchical partially observable Markov decision process models for robot navigation", In *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2, 1347–1352.
- [218] Thompson, P. D., Small, E. P., Johnson, M. and Marshall, A. R. 1998. "The pontis bridge management system", *Structural Engineering International*, 8(4), 303–308.
- [219] Tian, Z. and Liao, H. 2011. "Condition based maintenance optimization for multi-component systems using proportional hazards model", *Reliability Engineering & System Safety*, 96(5), 581–589.
- [220] Treharne, A. J. and Sox, C. R. 2002. "Adaptive inventory control for nonstationary demand and partial information", *Management Science*, 48(5), 607–624.
- [221] Tsang, A. 1995. "Condition-based maintenance: tools and decision making", *Journal of quality in maintenance engineering*, 1(3), 3–17.
- [222] Van Horenbeek, A. and Pintelon, L. 2013. "A dynamic predictive maintenance policy for complex multi-component systems", *Reliability Engineering & System Safety*, 120, 39–50.
- [223] Wang, H. 2002. "A survey of maintenance policies of deteriorating systems", *European journal of operational research*, 139(3), 469–489.

- [224] Watson, H. A. and Bell Telephone Laboratories. 1961. "Launch control safety study", Bell Telephone Laboratories, Murray Hill", Technical report, NJ, Tech. Rep.
- [225] Weber, P., Medina-Oliva, G., Simon, C. and Lung, B. 2012. "Overview on Bayesian networks applications for dependability, risk analysis and maintenance areas", *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 25(4), 671–682.
- [226] White, C. C. 1976. "Procedures for the solution of a finite-horizon, partially observed, semi-Markov optimization problem", *Operations Research*, 24(2), 348–358.
- [227] White, C. C. 1977. "A Markov quality control process subject to partial observation", *Management Science*, 23(8), 843–852.
- [228] White, C. C. 1991. "A survey of solution techniques for the partially observed Markov decision process", *Annals of Operations Research*, 32(1), 215–230.
- [229] Williams, J. D. Poupart, P. and Young, S. 2005. "Factored partially observable Markov decision processes for dialogue management", In *Proc. IJCAI Workshop on Knowledge and Reasoning in Practical Dialogue Systems*, 76–82.
- [230] Wu, S., Zhang, L., Zheng, W., Liu, Y. and Lundteigen, M. A. 2016. "A DBN-based risk assessment model for prediction and diagnosis of offshore drilling incidents", *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 34, 139–158.
- [231] Wu, X., Liu H., Zhang, L., Skibniewski, M. J., Deng, Q. and Teng, J. 2015. "A dynamic Bayesian network based approach to safety decision support in tunnel construction", *Reliability Engineering & System Safety*, 134, 157–168.
- [232] Young, S. 2006. "Using pomdps for dialog management", In *IEEE Spoken Language Technology Workshop*, 8–13.
- [233] Zequeira, R. I. and Bérenguer, C. 2005. "On the inspection policy of a two-component parallel system with failure interaction", *Reliability Engineering & System Safety*, 88(1), 99–107.
- [234] Zhang, J. and Liu, Z. 1996. "Calculating some inverse linear programming problems", *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 72(2), 261–273.
- [235] Zhang, N. L. and Liu, W. 1996. "Planning in stochastic domains: Problem characteristics and approximation", *Technical Report HKUST-CS96-31*, Hong Kong University of Science and Technology.

- [236] Zhang, Y., Zheng, R., Shen, G. and Chen, B. 2011. "Reliability analysis for cnc machine tool based on failure interaction", In International Conference on Intelligent Computing and Information Science, 489–496.
- [237] Zhou, R. and Hansen, E. 2001. "An improved grid-based approximation algorithm for POMDPs", In Proc. International Joint Conference on Artificial Intelligence, 707–716.
- [238] Zhu, B. and Frangopol, D. M. 2012. "Risk-based approach for optimum maintenance of bridges under traffic and earthquake loads", Journal of Structural Engineering, 139(3), 422–434.

TÜBİTAK
PROJE ÖZET BİLGİ FORMU

Proje Yürütücüsü:	Dr. Öğr. Üyesi DEMET ÖZGÜR ÜNLÜAKIN
Proje No:	117M587
Proje Başlığı:	Çok-Bileşenli Sistemlerin Bakım Eniyilemesinde Olasılıklı Grafikselle Modellerin Geliştirilmesi Ve Bunların Çözümleri
Proje Türü:	1001 - Araştırma
Proje Süresi:	28
Araştırmacılar:	SEZGİN ÇAĞLAR AKSEZER
Danışmanlar:	
Projenin Yürütüldüğü Kuruluş ve Adresi:	IŞIK Ü.
Projenin Başlangıç ve Bitiş Tarihleri:	15/10/2017 - 15/02/2020
Onaylanan Bütçe:	250760.0
Harcanan Bütçe:	222664.91
Öz:	<p>Endüstrinin gelişmesiyle sistemlerin karmaşıklığı ve buna bağlı olarak da işletmelerin bakım giderleri artmıştır. Bunun sonucunda günümüzde bakım faaliyetlerinin etkin planlanması ve yönetilmesi büyük önem kazanmıştır. Arıza ya da hata yüzünden gerçekleşen plansız makine duruşları hemen hemen her sektörde çok ciddi sonuçlar doğurabilmektedir. Bu projenin amacı bileşenleri arasında çeşitli bağımlılıkları olan kısmen gözlemlenebilir karmaşık çok-bileşenli sistemlerin bakım eniyilemesinde olasılıklı grafikselle modellerin kullanımını keşfetmek, bu tarz problemleri temsil eden bir gerçek-hayat sistemi üstünden konuyu ele alıp bu sistem için DBN ve POMDP modelleri geliştirmek ve bu modeller yardımıyla etkin bakım politikaları oluşturmaktır.</p> <p>Elektrik santralleri, birbirleriyle etkileşimli bileşenlerden oluşan karmaşık sistemlere sahiptir. Beklenmeyen bir arıza çok ciddi maliyetlere neden olacağından dolayı bakım eniyilemesi, bu sektör için çok kritiktir. Elektrik santrallerindeki çok-bileşenli sistemlerin bakım eniyilemesi, bildiğimiz kadarıyla, daha önceden çalışılmamıştır. Çok-bileşenli sistemlerin bakım eniyileme problemi de, henüz literatürde az çalışılmış olup tek-bileşenli sistemlerin bakım eniyilemesinden daha zordur.</p> <p>Bu çalışmada termik santrallerdeki çok-bileşenli kritik sistemlerden biri olan dönerli hava ısıtıcısı, Luvo sistemi, için DBN ve POMDP'leri kullanarak değişik bakım stratejileriyle politikalar elde edilmiştir. DBN'ler karmaşık sistemsel ilişkilerin ve zamansal değişimlerin modellenmesi ile olasılık çıkarımları konularında çok başarılı olup eniyileme yapmazlar. Ancak DBN bazlı geliştirilen sezgiseller eniyileme problemlerinde kullanılabilirler. Diğer yandan POMDP'ler sıralı karar problemlerinde çok başarılı olup eniyileme yaparlar. Ancak POMDP'lerin "boyutluluk" ve "geçmiş" problemleri olduğundan küçük boyutlu problemler dışında en iyi sonucu bulmakta zorlanırlar. Böyle durumlarda, yaklaşık algoritmaları kullanarak yaklaşık politikalar elde edilse de ele aldıkları problemlerdeki ilişkiler karmaşıklıktıkça ve değişken ile durum sayıları arttıkça bu politikaların çözüm kaliteleri düşmektedir. Proje kapsamında oluşturulan farklı zorluk seviyesinde iki varyantlı Luvo bakım problemi ve deneysel başka problemler üzerinden DBN ve POMDP bazlı stratejiler kapsamlı senaryolar kurgulanarak bu noktalar ışığında ayrıntılı olarak analiz edilip karşılaştırılmıştır.</p>
Anahtar Kelimeler:	Bakım eniyilemesi, POMDP, DBN, Elektrik Santralleri
Fikri Ürün Bildirim Formu Sunuldu Mu?:	Evet

Proje Yapılan Yayınlar:	<ol style="list-style-type: none">1- A DBN based reactive maintenance model for a complex system in thermal power plants (Makale - İndeksli Makale),2- Analysis Of Reactive Maintenance Strategies On A Multi-component System Using Dynamic Bayesian Networks (Bildiri - Uluslararası Bildiri - Sözlü Sunum),3- An Effective Maintenance Policy for a Multi-Component Dynamic System using Factored POMDPs (Bildiri - Uluslararası Bildiri - Sözlü Sunum),4- Maintenance Policy Simulation for a Factored Partially Observable System (Bildiri - Uluslararası Bildiri - Sözlü Sunum),5- Karmaşık Sistemlerin Bakım Kararlarında Olasılıklı Grafiksel Modellerin Kullanımı (Bildiri - Uluslararası Bildiri - Sözlü Sunum),6- Maintenance Optimization for a Multi Component System Using Factored Partially Observable Markov Decision Processes (Bildiri - Uluslararası Bildiri - Sözlü Sunum),7- Comparison of Various Policies under Different Maintenance Strategies on a Multi-Component System (Bildiri - Uluslararası Bildiri - Sözlü Sunum),8- Analyzing the Performance of Different Cost-Based Methods for the Corrective Maintenance of a System in Thermal Power Plants (Bildiri - Uluslararası Bildiri - Sözlü Sunum),9- A DBN Based Prognosis Model For A Complex Dynamic System: A Case Study In A Thermal Power Plant (Bildiri - Uluslararası Bildiri - Sözlü Sunum),10- Çok-Bileşenli Bir Sistem Üzerinde Dinamik Bayesçi Ağlar Kullanarak Farklı Bakım Politikalarının Analizi (Bildiri - Ulusal Bildiri - Sözlü Sunum),11- Karmaşık Sistemlerin Dinamik Bayesçi Ağlar ile Bakım Modellemesi: Bir Vaka Çalışması (Bildiri - Ulusal Bildiri - Sözlü Sunum),12- Analysis of Different Maintenance Policies on a Multi-component System using Dynamic Bayesian Networks (Tez (Araştırmacı Yetiştirilmesi) - Yüksek Lisans Tezi),13- Maintenance Optimization Of Multiple Component Systems Using Probabilistic Graphical Models (Tez (Araştırmacı Yetiştirilmesi) - Yüksek Lisans Tezi),
-------------------------	---