

# Sezgisel Arama

- G.W.Leibniz:

Özel buluşlara çok değer vermiyorum ve en çok arzu ettiğim şey, icat etme sanatını mükemmelleştirmek ve problemin çözümlerini bulmaktan ziyade, çözüm yöntemlerini bulmaktır; çünkü tek bir yöntem, sayısız çözümleri kapsar.

- Fagenbaum ve Fieldman:

Sezgisellik (sezgisel kurallar, sezgisel yöntem) problemin durum uzayı çok büyük olduğunda, çözümün aranmasını kesin biçimde sınırlayan herhangi bir kural, strateji, hile, sadeleştirme ve diğer etmenler kullanımınıdır.

- **Arama algoritmalarında sezgi:** hedefe ne kadar yakın olduğumuza dair tahmin üretmek

## Sezgisel Arama Algoritmaları

- İlk En İyi Arama - Best-first search
- A\* arama
- Lokal arama - Local search algorithms
  - Tepe Tırmanma- Hill-climbing search
  - Rasgele Başlangıçlı Tepe Tırmanma- Random-restart hill climbing
  - Paralel Tepe Tırmanma - Local beam search
  - Benzetimli Tavlama - Simulated annealing search
  - Genetik Algoritmalar

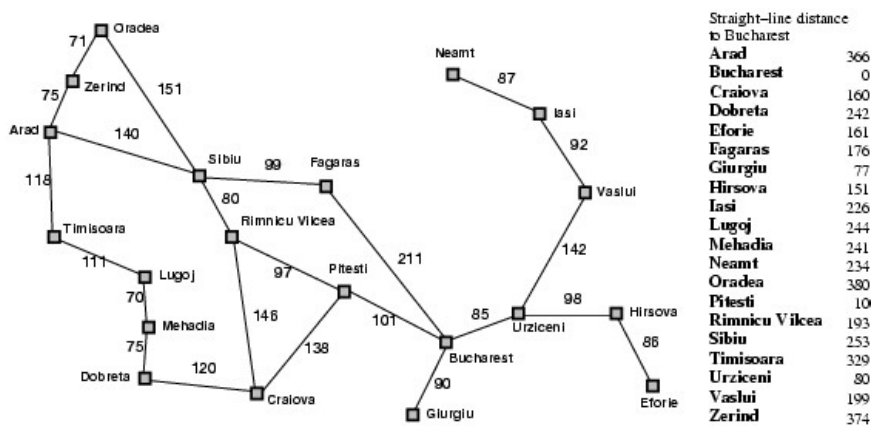
## İlk En İyi Arama Algoritması Best first search

- kuyruk = [kök durum]
- bulundu = FALSE
- While (kuyruk <> boş) and (bulundu = FALSE)
  - Kuyruktan ilk durum'u (N) çek
  - Eğer N hedef durumsa, bulundu = TRUE
  - N'den gidilebilecek tüm durumları kuyruğun sonuna ekle
  - Kuyruktaki durumlara **değerlendirme fonksiyonuna** göre bir puan ver ve durumları bu puanlara göre küçükten büyüğe sırala

## İlk En İyi Arama Algoritmasının Değerlendirme Fonksiyonu

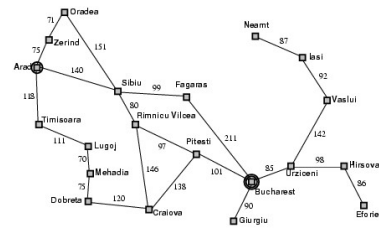
- Değerlendirme fonksiyonu
- $f(n) = h(n)$  (heuristic)
- = mevcut durumun hedefe tahmini uzaklığı
- Örnek  $h_{SLD}(n)$  = mevcut durumun (n) Hedefe kuş uçuşu mesafesi (SLD→Shortest Line Distance)
- Algoritma her adımda hedefe en yakın **gözük**en duruma ilerler.

## Romanya Haritası\* Amaç: Arad'dan Bükreş'e gitmek



[\*] <http://aima.cs.berkeley.edu/figures.pdf>

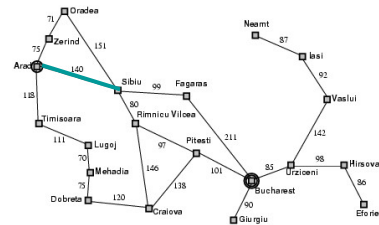
# İlk En İyi Arama Örneği



Mehmet Fatih AMASYALI Yapay Zeka Ders Notları

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ BİLGİSAYAR MÜHENDİSLİĞİ BÖLÜMÜ

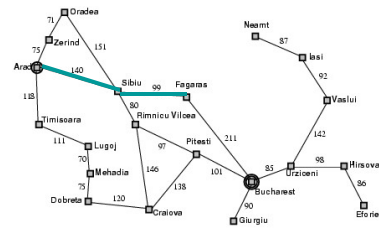
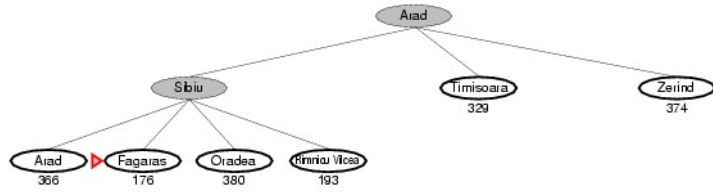
# İlk En İyi Arama Örneği



Mehmet Fatih AMASYALI Yapay Zeka Ders Notları

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ BİLGİSAYAR MÜHENDİSLİĞİ BÖLÜMÜ

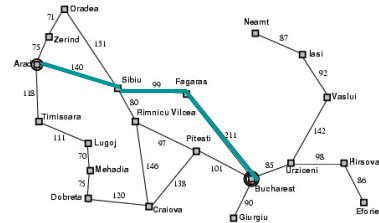
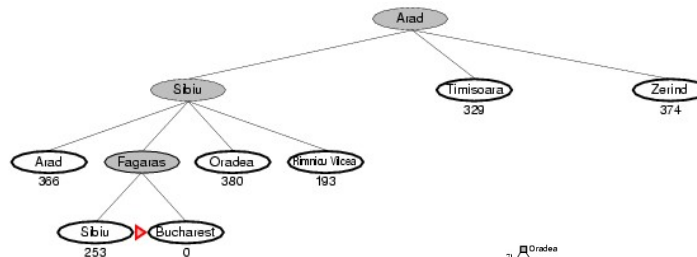
## İlk En İyi Arama Örneği



Mehmet Fatih AMASYALI Yapay Zeka Ders Notları

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ BİLGİSAYAR MÜHENDİSLİĞİ BÖLÜMÜ

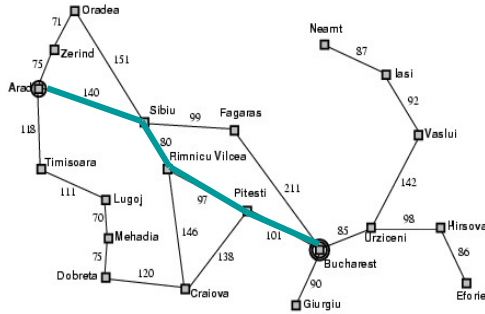
## İlk En İyi Arama Örneği



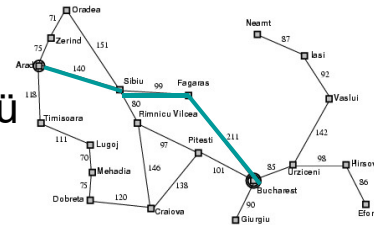
Mehmet Fatih AMASYALI Yapay Zeka Ders Notları

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ BİLGİSAYAR MÜHENDİSLİĞİ BÖLÜMÜ

## Optimum Çözüm



## İlk En İyi Arama'nın Çözümü



Mehmet Fatih AMASYALI Yapay Zeka Ders Notları

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ BİLGİSAYAR MÜHENDİSLİĞİ BÖLÜMÜ

## İlk En İyi Arama'nın Analizi

- **Complete?** Hayır, Loop'lara takılabilir. (Örneğin hedefe aynı mesafede iki durum arasında sonsuz döngü)
- **Time?**  $O(b^m)$ , Ancak iyi sezgisel kurallar büyük iyileşmeler sağlayabilir.
- **Space?**  $O(b^m)$ , Tüm durumlar hafızada
- **Optimal?** Hayır

Mehmet Fatih AMASYALI Yapay Zeka Ders Notları

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ BİLGİSAYAR MÜHENDİSLİĞİ BÖLÜMÜ

## A\* Arama

- Fikir: Kökten itibaren toplam maliyeti yüksek durumlara gidişi engellemek
- Değerlendirme Fonksiyonu:
- $f(n) = g(n) + h(n)$
- $g(n)$  = Kökten mevcut duruma (n) gelişin maliyeti
- $h(n)$  = Mevcut durumdan (n) hedefe gidişin tahmini maliyeti
- $f(n)$  = Kökten hedefe n'den geçilerek gidişin tahmini maliyeti

Mehmet Fatih AMASYALI Yapay Zeka Ders Notları

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ BİLGİSAYAR MÜHENDİSLİĞİ BÖLÜMÜ

## A\* Arama Örneği



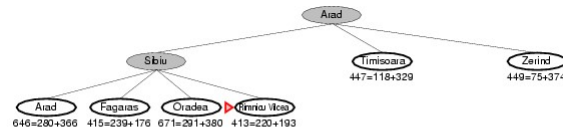
Mehmet Fatih AMASYALI Yapay Zeka Ders Notları

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ BİLGİSAYAR MÜHENDİSLİĞİ BÖLÜMÜ

## A\* Arama Örneği

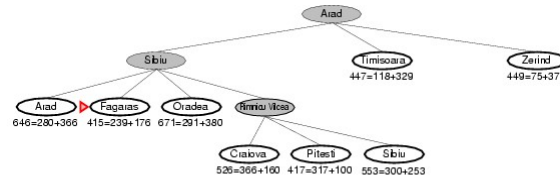


## A\* Arama Örneği





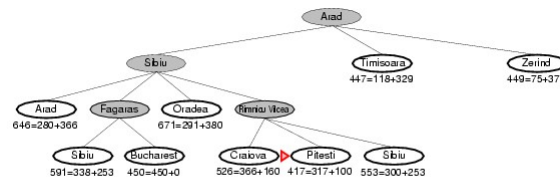
## A\* Arama Örneği



Mehmet Fatih AMASYALI Yapay Zeka Ders Notları

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ BİLGİSAYAR MÜHENDİSLİĞİ BÖLÜMÜ

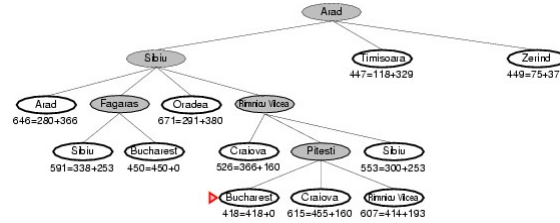
## A\* Arama Örneği



Mehmet Fatih AMASYALI Yapay Zeka Ders Notları

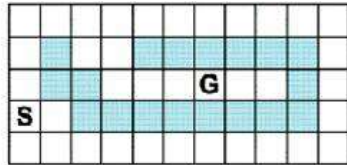
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ BİLGİSAYAR MÜHENDİSLİĞİ BÖLÜMÜ

## A\* Arama Örneği

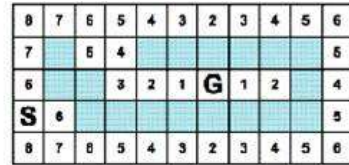


Mehmet Fatih AMASYALI Yapay Zeka Ders Notları

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ BİLGİSAYAR MÜHENDİSLİĞİ BÖLÜMÜ



(a)



(b)



(c)



(d)

- Amaç: S'den başla G'ye git.
- Tüm durumların hedefe olan Manhattan uzaklıkları (h)
- Best-First ile bulunan yol. Sadece h'leri kullanır.
- A\* ile bulunan yol. durumlardaki etiketler (h+g)

Mehmet Fatih AMASYALI Yapay Zeka Ders Notları

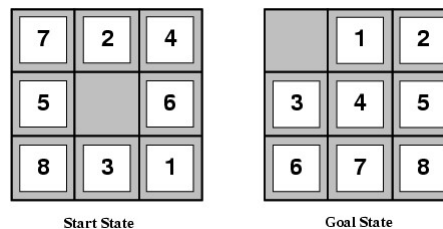
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ BİLGİSAYAR MÜHENDİSLİĞİ BÖLÜMÜ

## A\*'ın Analizi

- Complete? Evet, Loop'lara takılmaz. (?)
- Time?  $O(b^m)$ , Ancak iyi sezgisel kurallar büyük iyileşmeler sağlayabilir.
- Space?  $O(b^m)$ , Tüm durumlar hafızada
- Optimal? Evet (ama değerlendirme fonksiyonlarına bağlı)

## 8 Taş İçin Sezgisel Kurallar

- $h_1(n)$  = Yerinde olmayan taşların sayısı
- $h_2(n)$  = Taşların hedefteki yerlerine uzaklıkları toplamı (yatay ve dikey hane toplamı- Manhattan distance)



- $h_1(S) = ?$  8
- $h_2(S) = ?$   $3+1+2+2+2+3+3+2 = 18$

0	1	2
3	4	5
6	7	

Hedef Durum

0	1	2
3	4	5
6		7

$h_1=1$   
 $h_2=1$

0	2	5
3	1	7
6		4

$h_1=5$   
 $h_2=1+1+1+2+2=7$

Mehmet Fatih AMASYALI Yapay Zeka Ders Notları
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ BİLGİSAYAR MÜHENDİSLİĞİ BÖLÜMÜ

## Baskınlık / Dominance

- Geçerli iki sezgisel kural için tüm durumlarda
- $h_2(n) \geq h_1(n)$  ise
- $h_2$  baskındır / **dominates**  $h_1$
- $h_2$  arama için daha uygundur
  
- 8 taş için Arama Maliyetleri (test edilen durum sayısı ortalaması):
- $d=12$       IDS = 3,644,035 node
  - $A^*(h_1) = 227$  node
  - $A^*(h_2) = 73$  node
- $d=24$       IDS = çok çok node
  - $A^*(h_1) = 39,135$  node
  - $A^*(h_2) = 1,641$  node

## Esnetilmiş Problemler

- Orijinal problemden daha az kısıtlama içeren problemlere denir.
- 8 taş'ta bir taş istediği yere gidebilir dersek  $h_1(n)$  en kısa çözümü verir.
- 8 taş'ta bir taş istediği komşusuna gidebilir dersek  $h_2(n)$  en kısa çözümü verir.

## Yeni Problem

B	B	B	W	W	W	
---	---	---	---	---	---	--

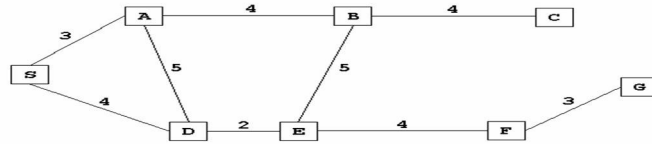
G: Hedef: Tüm W'ler B'lerin solunda

Operatörler:

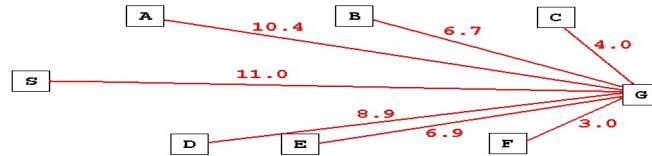
- 1) Bir taş yanındaki taşın diğer yanı boşsa üzerinden atlayabilir. Maliyeti 2.
- 2) Bir taş yanındaki boş yere gidebilir. Maliyeti 1.

H önerileri ?

Şekil-1 → Farklı şehirler arasındaki yol bağlantısı.  
Bağlantılardaki değerler → Şehirler arasındaki mesafe



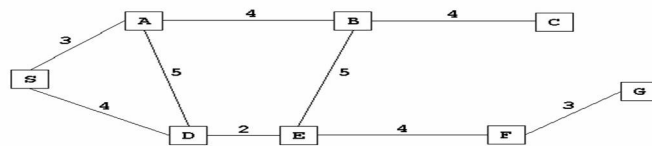
Şekil-2 → Farklı şehirlerin G şehrine olan doğrusal uzaklığı  
Amaç → S şehrinden G şehrine gitmek



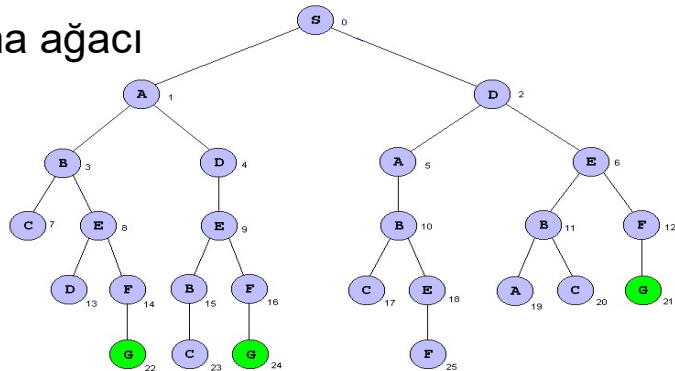
Mehmet Fatih AMASYALI Yapay Zeka Ders Notları

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ BİLGİSAYAR MÜHENDİSLİĞİ BÖLÜMÜ

Durum uzayı



Arama ağacı

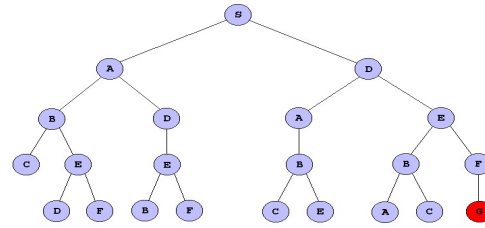
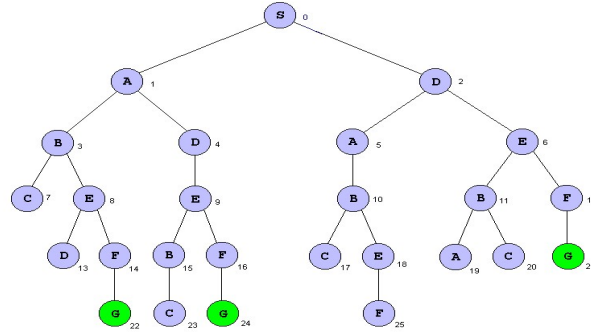


Mehmet Fatih AMASYALI Yapay Zeka Ders Notları

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ BİLGİSAYAR MÜHENDİSLİĞİ BÖLÜMÜ

### Enlemesine Arama Breadth-first search

[S]  
 [A<sub>1</sub>, D<sub>2</sub>]  
 [D<sub>2</sub>, B<sub>3</sub>, D<sub>4</sub>]  
 [B<sub>3</sub>, D<sub>4</sub>, A<sub>5</sub>, E<sub>6</sub>]  
 [D<sub>4</sub>, A<sub>5</sub>, E<sub>6</sub>, C<sub>7</sub>, E<sub>8</sub>]  
 [A<sub>5</sub>, E<sub>6</sub>, C<sub>7</sub>, E<sub>8</sub>, E<sub>9</sub>]  
 [E<sub>6</sub>, C<sub>7</sub>, E<sub>8</sub>, E<sub>9</sub>, B<sub>10</sub>]  
 [C<sub>7</sub>, E<sub>8</sub>, E<sub>9</sub>, B<sub>10</sub>, F<sub>12</sub>]  
 [E<sub>8</sub>, E<sub>9</sub>, B<sub>10</sub>, F<sub>12</sub>]  
 [E<sub>9</sub>, B<sub>10</sub>, F<sub>12</sub>, D<sub>13</sub>, F<sub>14</sub>]  
 [B<sub>10</sub>, F<sub>12</sub>, D<sub>13</sub>, F<sub>14</sub>, B<sub>15</sub>, F<sub>16</sub>]  
 [B<sub>11</sub>, F<sub>12</sub>, D<sub>13</sub>, F<sub>14</sub>, B<sub>15</sub>, F<sub>16</sub>, C<sub>17</sub>, E<sub>18</sub>]  
 [F<sub>12</sub>, D<sub>13</sub>, F<sub>14</sub>, B<sub>15</sub>, F<sub>16</sub>, C<sub>17</sub>, E<sub>18</sub>, A<sub>19</sub>, C<sub>20</sub>]  
 [D<sub>13</sub>, F<sub>14</sub>, B<sub>15</sub>, F<sub>16</sub>, C<sub>17</sub>, E<sub>18</sub>, A<sub>19</sub>, C<sub>20</sub>, G<sub>21</sub>]  
 [F<sub>14</sub>, B<sub>15</sub>, F<sub>16</sub>, C<sub>17</sub>, E<sub>18</sub>, A<sub>19</sub>, C<sub>20</sub>, G<sub>21</sub>]  
 [B<sub>15</sub>, F<sub>16</sub>, C<sub>17</sub>, E<sub>18</sub>, A<sub>19</sub>, C<sub>20</sub>, G<sub>21</sub>, G<sub>22</sub>]  
 [F<sub>16</sub>, C<sub>17</sub>, E<sub>18</sub>, A<sub>19</sub>, C<sub>20</sub>, G<sub>21</sub>, G<sub>22</sub>, C<sub>23</sub>]  
 [C<sub>17</sub>, E<sub>18</sub>, A<sub>19</sub>, C<sub>20</sub>, G<sub>21</sub>, G<sub>22</sub>, C<sub>23</sub>, G<sub>24</sub>]  
 [E<sub>18</sub>, A<sub>19</sub>, C<sub>20</sub>, G<sub>21</sub>, G<sub>22</sub>, C<sub>23</sub>, G<sub>24</sub>]  
 [A<sub>19</sub>, C<sub>20</sub>, G<sub>21</sub>, G<sub>22</sub>, C<sub>23</sub>, G<sub>24</sub>]  
 [C<sub>20</sub>, G<sub>21</sub>, G<sub>22</sub>, C<sub>23</sub>, G<sub>24</sub>, F<sub>25</sub>]  
 [G<sub>21</sub>, G<sub>22</sub>, C<sub>23</sub>, G<sub>24</sub>, F<sub>25</sub>]  
 BFS={S,D,E,F,G}

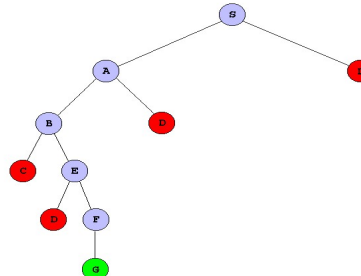
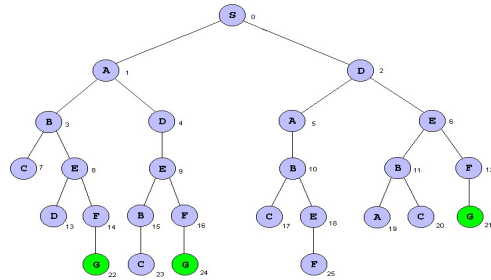


Harflerin altlarındaki sayılar, indisleri göstermektedir.

### Derinlemesine Arama Depth-first search

[S]  
 [A<sub>1</sub>, D<sub>2</sub>]  
 [B<sub>3</sub>, D<sub>4</sub>, D<sub>2</sub>]  
 [C<sub>7</sub>, E<sub>8</sub>, D<sub>4</sub>, D<sub>2</sub>]  
 [E<sub>8</sub>, D<sub>4</sub>, D<sub>2</sub>]  
 [D<sub>13</sub>, F<sub>14</sub>, D<sub>4</sub>, D<sub>2</sub>]  
 [F<sub>14</sub>, D<sub>4</sub>, D<sub>2</sub>]  
 [G<sub>22</sub>, D<sub>4</sub>, D<sub>2</sub>]

DFS={S,A,B,E,F,G}



Harflerin altlarındaki sayılar, indisleri göstermektedir.

### Düşük Maliyetli Arama Uniform cost search

[S<sub>0</sub>]

[A<sub>3</sub>, D<sub>4</sub>]

[D<sub>4</sub>, B<sub>7</sub>, D<sub>8</sub>]

[E<sub>6</sub>, B<sub>7</sub>, D<sub>8</sub>, A<sub>9</sub>]

[B<sub>7</sub>, D<sub>8</sub>, A<sub>9</sub>, F<sub>10</sub>, B<sub>11</sub>]

[D<sub>8</sub>, A<sub>9</sub>, F<sub>10</sub>, B<sub>11</sub>, C<sub>11</sub>, E<sub>12</sub>]

[A<sub>9</sub>, F<sub>10</sub>, E<sub>10</sub>, B<sub>11</sub>, C<sub>11</sub>, E<sub>12</sub>]

[F<sub>10</sub>, E<sub>10</sub>, B<sub>11</sub>, C<sub>11</sub>, E<sub>12</sub>, B<sub>13</sub>]

[E<sub>10</sub>, B<sub>11</sub>, C<sub>11</sub>, E<sub>12</sub>, B<sub>13</sub>, G<sub>13</sub>]

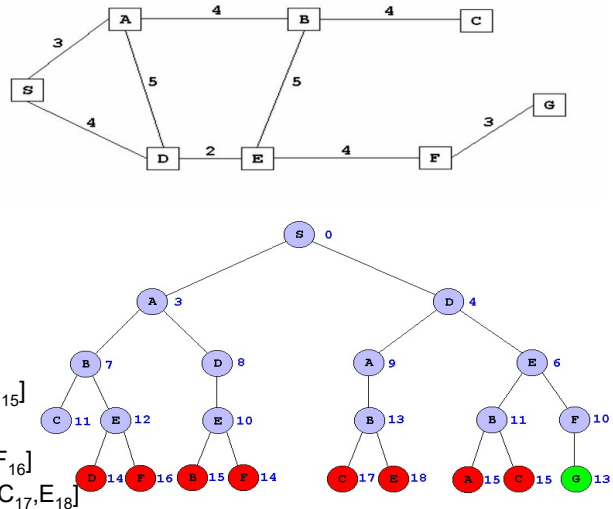
[B<sub>11</sub>, C<sub>11</sub>, E<sub>12</sub>, B<sub>13</sub>, G<sub>13</sub>, F<sub>14</sub>, B<sub>15</sub>]

[C<sub>11</sub>, E<sub>12</sub>, B<sub>13</sub>, G<sub>13</sub>, F<sub>14</sub>, B<sub>15</sub>, A<sub>15</sub>, C<sub>15</sub>]

[E<sub>12</sub>, B<sub>13</sub>, G<sub>13</sub>, F<sub>14</sub>, B<sub>15</sub>, A<sub>15</sub>, C<sub>15</sub>]

[B<sub>13</sub>, G<sub>13</sub>, F<sub>14</sub>, D<sub>14</sub>, B<sub>15</sub>, A<sub>15</sub>, C<sub>15</sub>, F<sub>16</sub>]

[G<sub>13</sub>, F<sub>14</sub>, D<sub>14</sub>, B<sub>15</sub>, A<sub>15</sub>, C<sub>15</sub>, F<sub>16</sub>, C<sub>17</sub>, E<sub>18</sub>]



UCS={S,D,E,F,G} Harflerin altlarındaki sayılar, S'den uzaklıklarını göstermektedir.

Mehmet Fatih AMASYALI Yapay Zeka Ders Notları

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ BİLGİSAYAR MÜHENDİSLİĞİ BÖLÜMÜ

### A\* Arama

$$f(n)=g(n)+h(n)$$

[S<sub>0</sub>]

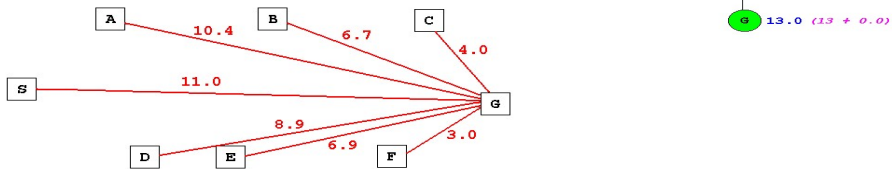
[D<sub>12.9</sub>, A<sub>13.4</sub>]

[E<sub>12.9</sub>, A<sub>13.4</sub>, A<sub>19.4</sub>]

[F<sub>13.0</sub>, A<sub>13.4</sub>, B<sub>17.7</sub>, A<sub>19.4</sub>]

[G<sub>13.0</sub>, A<sub>13.4</sub>, B<sub>17.7</sub>, A<sub>19.4</sub>]

A\*={S,D,E,F,G}



Harflerin altlarındaki sayılar, S'den uzaklıkları + G'ye uzaklıklarını göstermektedir.

Mehmet Fatih AMASYALI Yapay Zeka Ders Notları

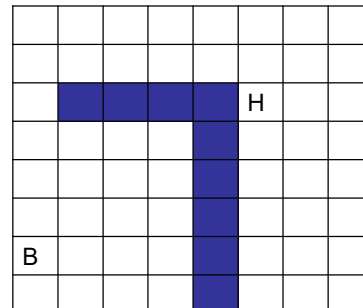
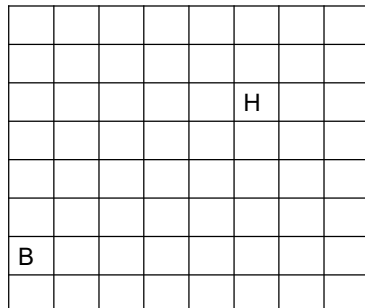
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ BİLGİSAYAR MÜHENDİSLİĞİ BÖLÜMÜ



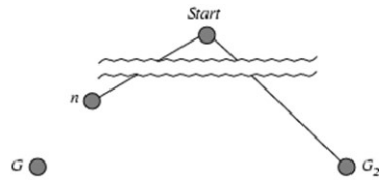
A* Arama										
<b>S</b> 11+0						<b>A</b> 10.4	<b>B</b> 6.7	<b>C</b> 4.0		
SA A 10.4+3	<b>SD</b> <b>D</b> 8.9+4									
<b>SA</b> <b>A</b> 10.4+3	SDS S 11+8	SDA A 10.4+9	SDE E 6.9+9			<b>D</b> 8.9	<b>E</b> 6.9	<b>F</b> 9.0	<b>G</b> 9.0	
SDS S 11+8	SDA A 10.4+9	SDE E 6.9+9	SAS S 11+6	SAD D 8.9+8	<b>SAB</b> <b>B</b> 6.7+7					
SDS S 11+8	SDA A 10.4+9	SDE E 6.9+9	SAS S 11+6	SAD D 8.9+8	SABA A 10.4+11	<b>SABE</b> <b>E</b> 6.9+8	SABC C 4+11			
SDS S 11+8	SDA A 10.4+9	SDE E 6.9+9	SAS S 11+6	SAD D 8.9+8	SABA A 10.4+11	<b>SABC</b> <b>C</b> 4+11	SABED D 8.9+13	SABEB B 6.7+9	SABEF F 3+12	
SDS S 11+8	SDA A 10.4+9	SDE E 6.9+9	SAS S 11+6	SAD D 8.9+8	SABA A 10.4+11	SABED D 8.9+13	SABEB B 6.7+9	<b>SABEF</b> <b>F</b> 3+12	SABCB B 6.7+15	
SDS S 11+8	SDA A 10.4+9	SDE E 6.9+9	SAS S 11+6	SAD D 8.9+8	SABA A 10.4+11	SABCB B 6.7+15	SABED D 8.9+13	SABEB B 6.7+9	SABEFE E 6.9+16	<b>SABEFG</b> <b>G</b> 0+15
Mehmet Fatih AMASYALI Yapay Zeka Ders Notları										
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ BİLGİSAYAR MÜHENDİSLİĞİ BÖLÜMÜ										

## Bir Soru

- Aşağıdaki labirentlerde A\*, Best-First, Düşük maliyetli arama, Enlemesine / Derinlemesine arama nereleri dener ? Nasıl yollar bulur?



- A\* 'ın optimallığı



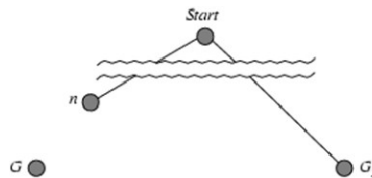
- A\* optimaldir, eğer:  
h gerçek maliyeti  
daha düşük tahmin  
ediyorsa ve tüm  
maliyetler pozitifse

- G optimal, G2 suboptimal çözüm olsun.
- Stack'te n (optimal yola götüren seçim) ve G2 var.
- A\*, G2'yi n'den önce açar mı (stack'ten çeker mi) ?
- Eğer  $f(n) < f(G2)$  yi gösterirsek n, G2'den önce seçilir.

Mehmet Fatih AMASYALI Yapay Zeka Ders Notları

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ BİLGİSAYAR MÜHENDİSLİĞİ BÖLÜMÜ

- A\* 'ın optimallığı

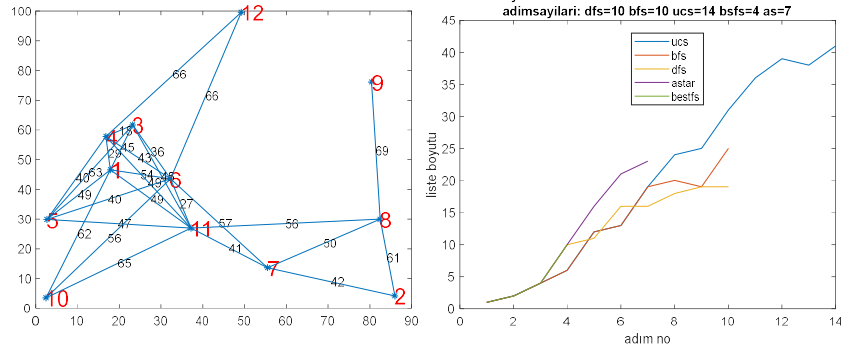


- $f(G2) = g(G2)$       $h(G2) = 0$  olduğundan
- $f(G) = g(G)$       $h(G) = 0$  olduğundan
- $g(G2) > g(G)$      G2 optimal değil
- $f(G2) > f(G)$       $f(G2) = g(G2) + h(G2)$  ve  
 $f(G) = g(G) + h(G)$
- $h(n) \leq h^*(n)$       $h^*$  gerçek maliyet
- $g(n) + h(n) \leq g(n) + h^*(n)$      iki tarafa da  $g(n)$  ekle
- $f(n) \leq f(G)$       $g(n) + h(n) = f(n)$  ve  $g(n) + h^*(n) = f(G)$
- **$f(n) < f(G2)$**       $f(G2) > f(G)$  olduğundan

Mehmet Fatih AMASYALI Yapay Zeka Ders Notları

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ BİLGİSAYAR MÜHENDİSLİĞİ BÖLÜMÜ

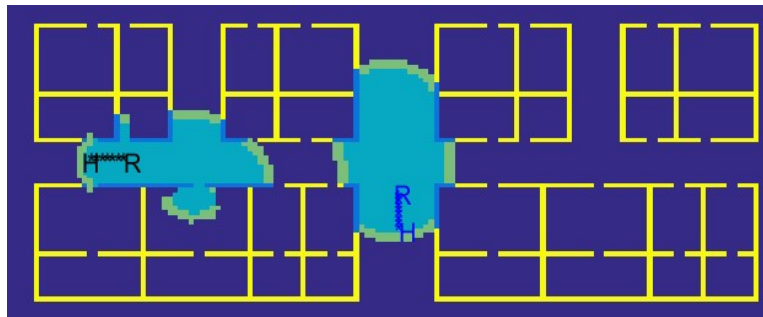
## Uygulama my\_search.m



Mehmet Fatih AMASYALI Yapay Zeka Ders Notları

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ BİLGİSAYAR MÜHENDİSLİĞİ BÖLÜMÜ

## Uygulama: Robotlarla Keşif\*



[\*] Salih MARANGOZ, Mehmet Fatih AMASYALI, Erkan USLU, Furkan ÇAKMAK, Nihal ALTUNTAŞ, Sırma YAVUZ (2019).  
More scalable solution for multi-robot-multi-target assignment problem.  
ROBOTICS AND AUTONOMOUS SYSTEMS, 113, 174-185, Doi: 10.1016/j.robot.2019.01.005

Mehmet Fatih AMASYALI Yapay Zeka Ders Notları

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ BİLGİSAYAR MÜHENDİSLİĞİ BÖLÜMÜ

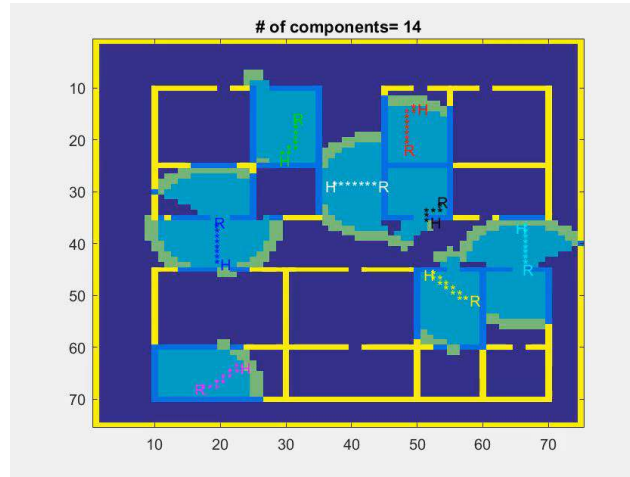
## Tek robotla keşif algoritması

- Hedefleri belirle
- Hedeflerin iyiliğini hesapla
- Hedefi seç
- Robot-hedef için yol bul ( $A^*$ )
- Robotu hedefine doğru ilerlet
- Robot hedefine varınca başa dön

## Çok robotla keşif algoritması

- Hedefleri belirle
- Hedeflerin her bir robot için iyiliklerini hesapla
- Robot-hedef eşlemesi yap
- Eşlenmiş robot-hedef ikilileri için yolları bul
- Robotları hedeflerine doğru ilerlet
- Robotlardan biri hedefine varınca başa dön

## 8 robotla keşif



## Özet

- Sezgisel arama yöntemleri, problem hakkındaki bilgiden yararlanırlar.
- Sezgi (Heuristic), hedefe ulaşmak için kalan maliyetin tahminidir.
- İyi bir sezgi, arama süresini, üstelden doğrusala indirir.
- A\*, AI'da anahtar teknolojidir.

## Kaynaklar

- <http://aima.cs.berkeley.edu/>
- <http://www.cs.trincoll.edu/~ram/cpsc352/notes/astar.html>