

Adaptivno simulirano kaljenje

Aleksandar Cvetković

Matematički fakultet

October 15, 2025

Overview

1. Uvod

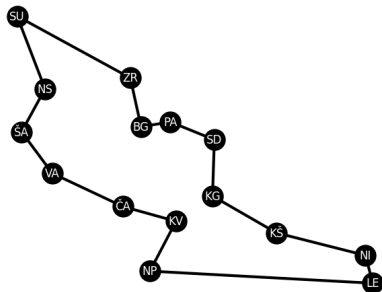
2. Adaptivno simulirano kaljenje

3. Rezultat

- Kaljenje
- Simulirano kaljenje
- Adaptivno simulirano kaljenje

Problem trgovačkog putnika

- Zašto baš ovaj problem?
- Definicija
- Simetrični i asimetrični problem



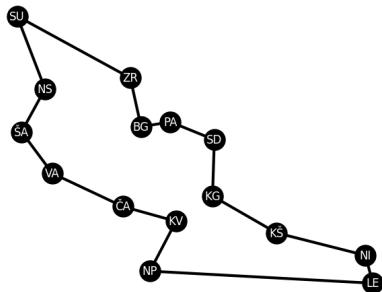
Standardni algoritam

Slika 1 Pseudokod standardnog algoritma

```
1: procedure SIMULIRANOKALJENJE
2:    $MaxIters \leftarrow$  Maksimalni broj iteracija algoritma
3:    $Ciklus \leftarrow$  Inicijalni ciklus
4:    $NajboljiCiklus \leftarrow Ciklus$ 
5:   while  $k < MaxIters$  do
6:      $NoviCiklus \leftarrow$  GenerišiNoviCiklus( $Ciklus$ )
7:      $r \leftarrow$  Nasumični broj iz intervala (0, 1)
8:     if Dužina( $NoviCiklus$ )  $<$  Dužina( $Ciklus$ ) then
9:        $Ciklus \leftarrow NoviCiklus$ 
10:    if Dužina( $Ciklus$ )  $<$  Dužina( $NajboljiCiklus$ ) then
11:       $NajboljiCiklus \leftarrow Ciklus$ 
12:    else if  $r < 1 / k$  then
13:       $Ciklus \leftarrow NoviCiklus$ 
14:     $k \leftarrow k + 1$ 
15:  return  $Ciklus$ 
```

Standardni algoritam

Da li možemo manje nasumično da bираmo lošije rešenje?



Standardni algoritam

Novo rešenje biramo tako da ono nije mnogo gore u odnosu na prethodno rešenje.

$$h(\Delta E) = \frac{1}{1 + \exp \frac{\Delta E}{T}}$$
$$\approx \exp \frac{-\Delta E}{T}$$

Bolcmanovo kaljenje

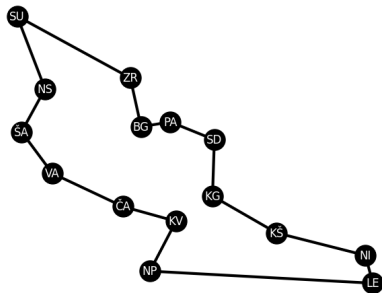
Slika 2 Pseudokod unapređenog algoritma

```
1: procedure BOLCMANOVOŠIMULIRANOKALJENJE
2:    $T0 \leftarrow$  Početna temperatura
3:    $MaxIters \leftarrow$  Maksimalni broj iteracija algoritma
4:    $Ciklus \leftarrow$  Inicijalni ciklus
5:    $NajboljiCiklus \leftarrow Ciklus$ 
6:   while  $k < MaxIters$  do
7:      $NoviCiklus \leftarrow$  GenerišiNoviCiklus( $Ciklus$ )
8:      $r \leftarrow$  Nasumični broj iz intervala (0, 1)
9:     if  $Dužina(NoviCiklus) < Dužina(Ciklus)$  then
10:        $Ciklus \leftarrow NoviCiklus$ 
11:       if  $Dužina(Ciklus) < Dužina(NajboljiCiklus)$  then
12:          $NajboljiCiklus \leftarrow Ciklus$ 
13:     else if  $r < \exp(-(Dužina(NoviCiklus) - Dužina(Ciklus))/T)$ 
14:       then
15:          $Ciklus \leftarrow NoviCiklus$ 
16:        $k \leftarrow k + 1$ 
17:        $T \leftarrow T0/\ln(k)$ 
18:   return  $Ciklus$ 
```


Adaptivno simulirano kaljenje

Šta je problem sa Bolcmanovim kaljenjem?

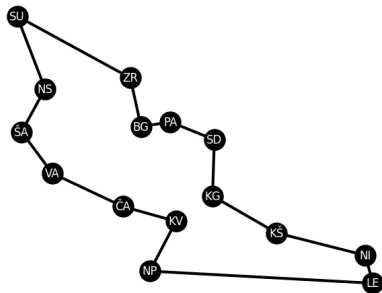
1. Generiše nove cikluse koji su već bili neuspešni.
2. Lokalni minimumi
3. Parametar temperature



Adaptivno simulirano kaljenje

Kako rešiti prvi problem?

- Uvodimo parametar temperature za svaku dimenziju problema
- Definišemo T -funkciju smanjenja temperature za svaku dimenziju problema

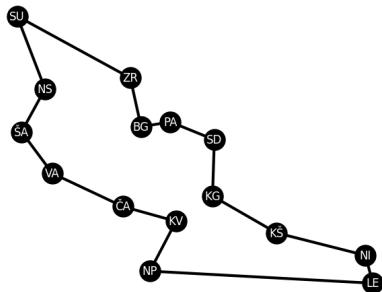


Adaptivno simulirano kaljenje

$$T_i(k) = T_{0i} \exp \left(-c_i k_i^{\frac{1}{D}} \right)$$

za k -tu iteraciju algoritma gde je

- k_i broj promene rešenja na i -toj dimenziji
- D je dimenzija problema
- T_{0i} početna temperatura za dimenziju i
- c_i slobodni parametar



Adaptivno simulirano kaljenje

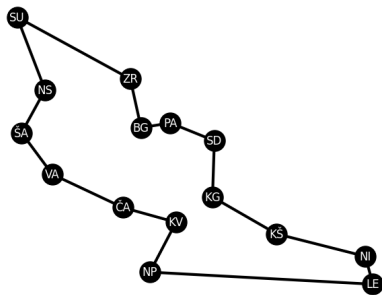
$$c_i = m_i \exp \frac{-n_i}{D}$$

$$m_i = -\log(\text{TemperatureRatioScale})$$

,

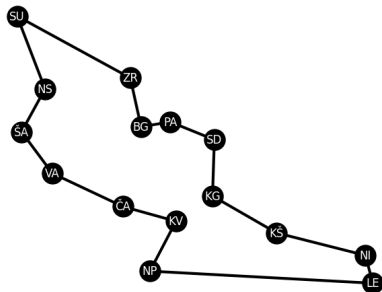
$$n_i = \log(\text{TemperatureAnnealScale})$$

,



Adaptivno simulirano kaljenje

Kako rešiti drugi problem lokalnih minimuma?



Adaptivno simulirano kaljenje

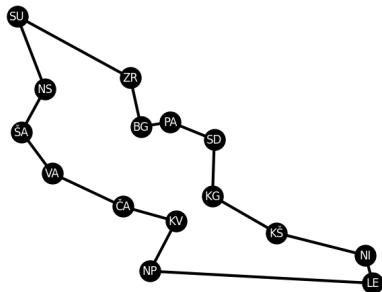
Reannealing:

$$k_i \rightarrow k'_i,$$

$$T'_{ik'} = T_{ik} \frac{s_{max}}{s_i},$$

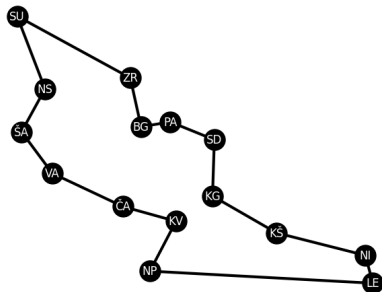
$$k'_i = \left(\frac{\ln \frac{T_{i0}}{T_{ik'}}}{c} \right)^D.$$

T = vrednost poslednjeg minimuma

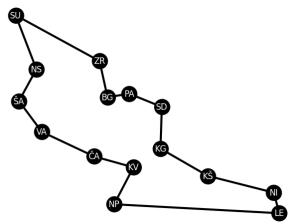
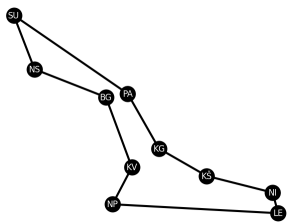
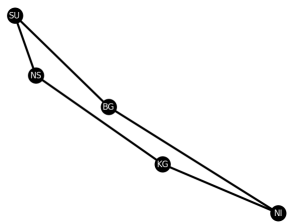


Adaptivno simulirano kaljenje

Ovim je i treći problem rešen.



Rezultat



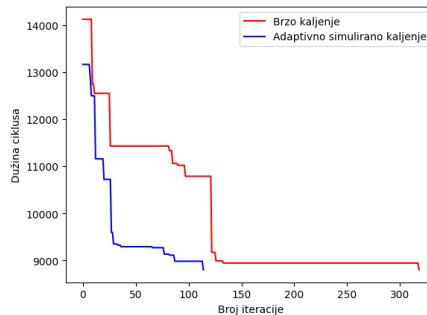
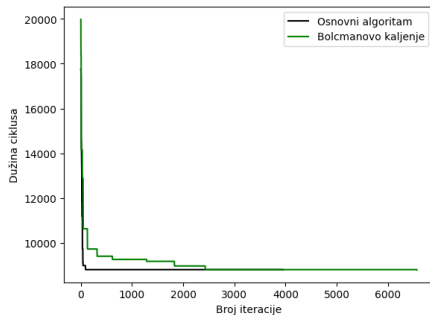
Rezultat

Naziv algoritma	rs5.tsp	rs10.tsp	rs15.tsp
Gruba sila	$1.703 \cdot 10^{-4}$	21.927	$7.567 \cdot 10^{6**}$
Osnovni algoritam	$1.734 \cdot 10^{-4}$	0.084	-
Bolcmanovo kaljenje	$3.08 \cdot 10^{-4}$	0.152	23.934
Brzo kaljenje	$2.535 \cdot 10^{-4}$	0.01	0.016
Adaptivno simulirano kaljenje	$3.366 \cdot 10^{-4}$	0.003	0.021

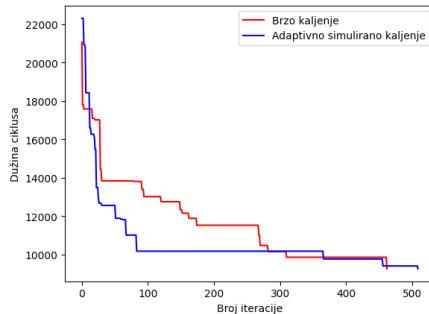
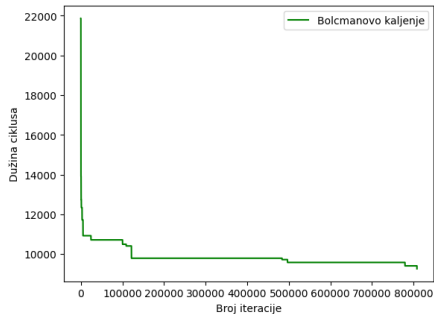
Table: Vreme zaustavljanja algoritama izraženo u sekundama.

**_oko 87 dana

Rezultat



Rezultat

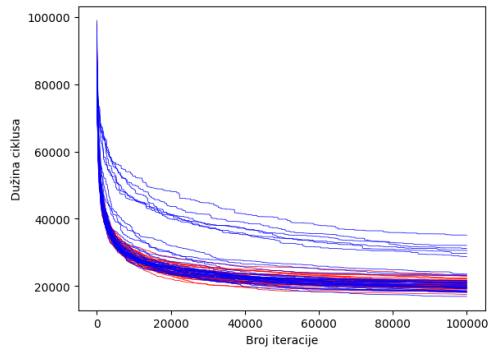
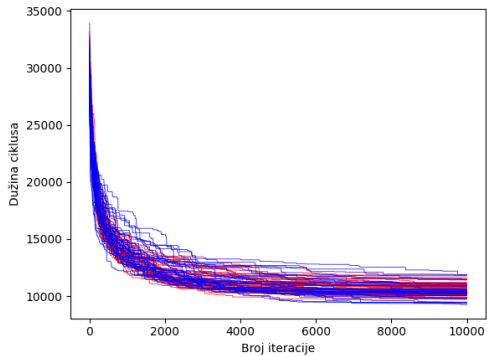


Rezultat: berlin52 i qa194

Parametri:

- Brzo kaljenje: $T = [GlobalniMinimum, 2 * GlobalniMinimum]$
- Adaptivno simulirano kaljenje:
 $TemperatureRatioScale \times TemperatureAnnealScale \times ReannealRate$
 $= [0.00001, 0.0001, 0.001, 0.01] \times [10, 100, 1000] \times [10, 30, 50]$

Rezultat: berlin52 i qa194



Hvala na pažnji!