OpenMP

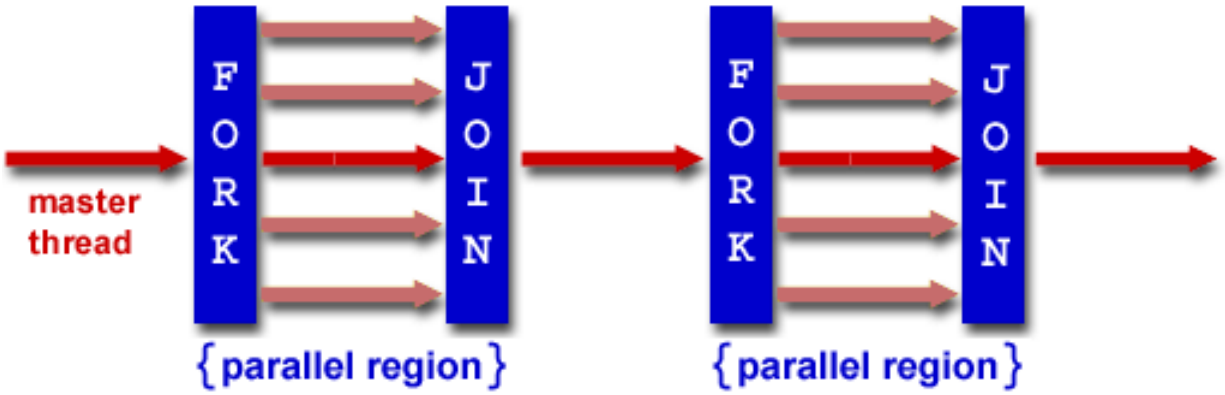
Šta je OpenMP

- OpenMP predstavlja skup kompajlerskih direktiva (u C-u se one zovu pragma) koje omogućavaju paralelizaciju programa za sisteme sa deljivom memorijom (shared memory), kao što su npr. multicore procesori
- OpenMP se sastoji od
  - Skupa direktiva
  - Skupa (run-time) bibliotečkih funkcija
  - Skupa promenljivih okruženja (environment variables)
- Ove tri stvari čine API za paralelno programiranje na sistemima sa deljivom memorijom.
  - OpenMP je nezavistan od hardvera i OS.
  - Postoji za sve glavne verzije UNIX i Windows OS
  - C i C++ implementacije imaju standardni include file omp.h, koji omogućava definisanje openMP tipova podataka i korišćenje bibliotečkih funkcija.

OpenMP - programski model

- OpenMP koristi fork-join model paralelnog izvršenja.
  - Svaki OpenMP program počinje sa jednom niti izvršenja (master thread - glavna nit).
  - U fork-join modelu master nit se izvršava sekvencijalno dok ne naiđe na direktivu kojom se definiše paralelni region, kada se kreira tim paralelnih niti (FORK - viljuška) koje dalje nastavljaju paralelno da se izvršavaju.
  - Kada tim niti okonča izvršenje paralelnog regiona, sinhronizuju se i okončavaju sa izvršenjem, nakon čega ostaje samo master thread koji se izvršava sekvencijalno (JOIN).
  - Na kraju svakog paralelnog regiona se nalazi implicitna tačka sinhronizacije, tvz. barijera.
    - Kada se koristi ova vrsta sinhronizacije ni jedna nit ne može da nasatvi sa izvršenjem sve dok sve niti ne stignu do barijere.
  - Niti u OpenMP komuniciraju preko deljivih promenljivih

Fork-join model izvršenja



OpenMP - osobine

- OpenMP direktive su specijalno formatirani komentari ili pragme koje se primenjuju na niz naredbi koji sledi iza njih.
  - Najveći broj direktiva se primenjuje na strukturni blok naredbi.
    - Strukturni blok predstavlja skup izvršnih naredbi sa jednim ulazom na vrhu i jednim izlazom na dnu (kraju) bloka.
- OpenMP omogućava programeru da
  - kreira tim niti za paralelno izvršenje
  - specificira kako se vrši podela posla između niti u timu
  - deklariše deljive i lokalne promenljive za niti
  - sinhronizuje niti i omogući da se neke operacije obavljaju ekskluzivno, tj. uzajamno isključivo

Kreiranje tima niti

- Tim niti se kreira da bi se izvršile naredbe koje se nalaze u paralelnom regionu.
- Da bi se kreirao tim niti programer jednostavno specificira paralelni region koristeći direktivu parallel
  - Uz ovu direktivu moguće je navesti dodatne informacije o kojima će biti reči kasnije.
- Na kraju svakog paralelnog regiona se nalazi implicitna tačka sinhronizacije, tvz. barijera.
  - Kada se koristi ova vrsta sinhronizacije ni jedna nit ne može da nasatvi sa izvršenjem sve dok sve niti ne stignu do barijere

Podela posla između niti

- Ako programer ne navede kako će se izvršiti podela posla između niti u paralelnom regionu, svaka nit će izvršiti sve naredbe koje se nalaze u paralelnom regionu.
  - Ovakav prilaz očigledno ne bi doveo do ubrzanja izvršenja programa.
- OpenMP direktive za podelu posla omogućavaju programeru da odredi kako će se izračunavanje u strukturnom bloku podeliti između niti u timu.
  - I kod ovih direktiva se implicitno podrazumeva barijerna sinhronizacija na kraju direktive.
    - Programer može eksplicitno ukinuti barijeru na kraju konstrukcija za podelu posla.
- To su direktive
  - for, sections, single i task.

Memorijski model OpenMP

- OpenMP je baziran na deljivoj memoriji i po definiciji (by default) podaci su deljivi između niti i vidljivi svim nitima.
- Ponekad postoji potreba da izvesni podaci budu privatni za niti.
  - Npr. kada tim niti izvršava paralelnu for petlju neophodno je da svaka nit ima svoj privatni indeks petlje (iterativnu promenljivu petlje).
    - Zbog toga je indeksna promenljiva paralelne for petlje privatna za svaku nit u timu.
- OpenMP pruža mogućnost progarmeru i da eksplicitno definiše koje su promenljive deljive a koje privatne korišćenjem posebnih odredbi ili klauzula (clauses).
  - Niti u OpenMP komuniciraju preko deljivih promenljivih.
- Potrebno je obezbediti da niti zapamte privatne podatke u toku izvršenja.
  - Za ovo postoji posebna oblast u memoriji poznata kao thead stack (magacin niti).

Sinhronizacija niti

- Sinhronizacija ili koordinacija akcija niti je nekad neophodna da bi se obezbedio korektan pristup deljivim (zajedničkim) podacima i da bi se sprečilo narušavanje podataka.
- OpenMP nudi relativno mali skup jednostavnih sinhronizacionih mehanizama.
- Već smo napomenuli da OpenMP usvaja implicitno postojanje barijere na kraju svake paralelne konstrukcije za podelu posla.
  - Kod ovog vida sinhronizacije zahteva se da sve niti stignu do barijere pre nego što nastave dalje sa izvršenjem.
    - Sinhronizaciju samo određenog podskupa niti je teže postići i zahteva veći napor jer OpenMP ne sadrži eksplicitnu podršku za to.
- Ponekad je neophodno obezbediti da samo jedna nit u jednom trenutku izvršava deo programskog koda.
  - OpenMP ima nekoliko mehanizama koji omogućavaju ovakav vid sinhronizacije.
- Za sinhronizaciju niti, pored barrier, OpenMP nudi i direktive:
  - ordered, critical, atomic, lock, master.

Koliko niti je u timu?

- Za neke aplikacije je važno da može da se upravlja brojem niti koje izvršavaju paralelni region.
- OpenMP omogućava programeru da specificira ovaj broj
  - pre izvršenja programa korišćenjem odgovarajuće promenljive okruženja (environment variable),
  - nakon početka izvršenja korišćenjem izvršne bibliotečke funkcije, ili
  - na početku paralelnog regiona korišćenjem odgovarajuće odredbe (klauzule).
- Ako se ovo ne uradi, onda broj niti zavisi od implementacije.
- OpenMP svakoj niti u timu dodeljuje jedinstveni identifikator koji se kreće u garnicama od 0 do broj niti-1.

OpenMP - detalji

- OpenMP omogućava da se paralelizacija programa obavi postepeno korišćenjem direktiva.
  - Važno je prvo uočiti koji delovi programa mogu da se paralelizuju, ispred takvih delova (regiona) ubaciti direktivu kojom se kreira tim niti tj definiše paralelni region, a zatim i neku od direktiva kojom se definiše podela posla između niti.
    - Ako se ovo drugo ne uradi sve niti će izvršiti sve instrukcije u paralelnom regionu.
- Sintaksa OpenMP direktiva je sledeća

  #pragma omp ime_direktive *[odredba[[,] odredba]...]*
  - *omp* ključna reč govori da je reč o OpenMP pragmi koje kompajlira samo OpenMP kompajler, a ignorišu ne OpenMP kompajleri
  - *ime_direktive* ime direktive (npr. parallel, for, section, ...)
  - *odredbe* (klauzule, eng. clauses) se koriste da daju dodatne informacije direktivi
    - (npr #**pragma omp for** private (a).
      - Ovde je private odredba koja kaže da je promenljiva a privatna za svaku nit u timu.)

OpenMP direktive

- U OpenMP su na raspolaganju sledeće direktive
  - Parallel direktiva
  - Direktive za podelu posla
    - for
    - section
    - single
    - task
  - Direktive za sinhronizaciju niti
    - Barrier
    - Ordered
    - Critical
    - Atomic
    - Locks
    - Master
- Svaka direktiva opciono može sadržati i veći broj odrebi (klauzula)

Direktiva parallel

- Osnovna direktiva u OpenMP je parallel direktiva
- Sitaksa
  - #pragma omp parallel [odredba[[,] odredba]...]
  - strukturni blok
- Ova direktiva se koristi da definiše izračunavanje koje treba da se obavi paralelno
- Ovom direktivom se kreira tim niti i definiše paralelni region u kome će taj tim raditi.
  - Paralelni region se završava na kraju strukturnog bloka.
    - U najvećem broju slučajeva strukturni blok je ograničem parom zagrada { }.
  - Kada nit programa dođe do ove direktive kreira se tim niti da izvrši paralelni region.
  - Ova direktiva obezbeđuje da se izračunavanja obave paralelno ali ne obavlja raspodelu (distribuciju) posla unutar regiona između tima niti.
    - Ako programer ne upotrebi odgovarajuću direktivu za podelu posla, ceo posao će biti repliciran.
  - Na kraju parallelnog regiona je implicitna barrier direktiva koja prisiljava niti da čekaju dok sve niti iz tima ne obave posao unutar paralelnog regiona.
  - Nit koja naiđe na parallel direktivu postaje master nit u timu niti.
    - Svakoj niti u timu se dodeljuje identifikator niti (thread id).
    - Master nit ima id=0. Identifikatori se kreću od 0 do broja niti-1
    - Bibliotečka funkcija omp_get_thread_num() vraća identifikator svake niti u timu.

Primer

```
#include <omp.h>
#include <stdio.h>
void main()
{
#pragma omp parallel
   {
     int ID = omp_get_thread_num();
     printf(" hello(%d) ", ID);
     printf(" world(%d) \n", ID);
   }
}
```

- Mada se paralelni region izvršava od strane svih niti u timu, svaka nit može imati svoj put izvršenja
- Jedan od mogucih izlaza za 4 niti:

```
hello(1) hello(0) world(1)
world(0)
hello (3) hello(2) world(3)
world(2)
```

Primer2

```
#pragma omp parallel
   {
     printf("The parallel region is executed by thread %d\n",
        omp_get_thread_num());

     if ( omp_get_thread_num() == 2 ) {
        printf("  Thread %d does things differently\n",
              omp_get_thread_num());
     }
   }  /*-- End of parallel region --*/
```

U ovom primeru će sve niti izvršiti prvu printf, ali će drugu printf izvršiti samo nit čiji je id=2.
U slučaju da se tim sastoji od 4 niti, jedan od mogućih izlaza bi bio

```
The parallel region is executed by thread 0
The parallel region is executed by thread 3
The parallel region is executed by thread 2
  Thread 2 does things differently
The parallel region is executed by thread 1
```

Moguće odredbe (klauzule) uz parallel direktivu

* Sa parallel direktivom mogu se koristiti sledeće odredbe

if *(scalar-expression)*	(C/C++)
if *(scalar-logical-expression)*	(Fortran)
num_threads *(integer-expression)*	(C/C++)
num_threads *(scalar-integer-expression)*	(Fortran)
private *(list)*	
firstprivate *(list)*	
shared *(list)*	
default(none|shared)	(C/C++)
default(none|shared|private)	(Fortran)
copyin *(list)*	
reduction *(operator:list)*	(C/C++)
reduction *({operator | intrinsic_procedure_name}:list)*	(Fortran)

- samo jedna if odredba se može pojaviti u parallel direktivi
- samo jedna num_threads odredba se može pojaviti u direktivi. Izraz mora vratiti pozitivan ceo broj

Direktive za podelu posla između niti

- definišu kako će posao u paralelnom regionu biti podeljen između niti.
  - Ove direktive se moraju naći u okviru regiona koji je definisan parallel direktivom da bi imale efekta
  - Ako se ovakvae direktive pojave u okviru sekvencijalnog regiona, jednostavno se ignorišu
- OpenMP. C/C++ ima tri takve direktive

Functionality	Syntax in C/C++
Distribute iterations over the threads	**#pragma omp for**
Distribute independent work units	**#pragma omp sections**
Only one thread executes the code block	**#pragma omp single**

Direktive za podelu posla (nast.)

- Ove direktive ne kreiraju nove niti i nemaju barijeru na ulasku.
- Po definiciji, niti čekaju na barijeri na kraju regiona kojim se definiše podela posla dok i poslednja nit ne okonča sa izvršenjem svog dela posla.
  - Programer može ovo poništiti korišćenjem *nowait* klauzule

for direktiva

- Ova direktiva uzrokuje da iteracije petlje budu izvršene paralelno.
- U C/C++ programima korišćenje ove direktive je ograničeno na brojačke petlje
- U fazi izvršenja (run-time) iteracije petlje se distribuiraju nitima.
- Sintaksa

```
#pragma omp for [clause[[,] clause]...]
    for-loop
```

- petlja koja se paralelizuje ne sme imati zavisnosti između različitih iteracija (ni loop carry ni WAR)!

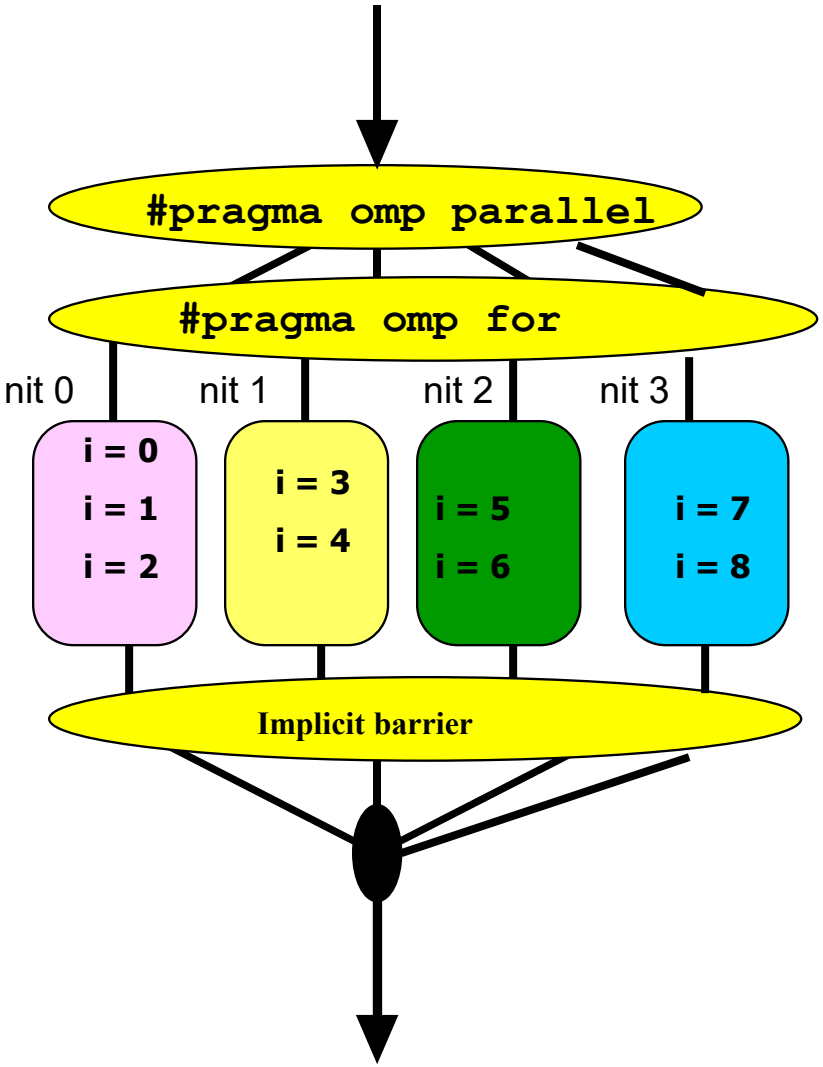
Primer

```
#pragma omp parallel shared(n) private(i)
{
   #pragma omp for
   for (i=0; i<n; i++)
      printf("Thread %d executes loop iteration %d\n",
            omp_get_thread_num(),i);
} /*-- End of parallel region --*/
```

Jedan od mogućih izlaza za n=9 i 4 niti je

```
Thread 0 executes loop iteration 0
Thread 0 executes loop iteration 1
Thread 0 executes loop iteration 2
Thread 3 executes loop iteration 7
Thread 3 executes loop iteration 8
Thread 2 executes loop iteration 5
Thread 2 executes loop iteration 6
Thread 1 executes loop iteration 3
Thread 1 executes loop iteration 4
```

Primer: podela posla između niti u for petlji



- Niti sa identifikatorima 1,2 i 3 izvršavaju po 2 iteracije petlje a nit 0 tri.
- Ako programer eksplicitno ne navede kako se vrši distribucija posla po nitima, onda će to uraditi kompajler.
- Distribucija iteracija po nitima zavisi od implementacije kompajlera.
- Moguće ja da u istoj aplikaciji u različitim petljama bude različita distribiciaj posla po nitima.
- Pomoću *schedule* odredbe (klauzule) programer može da definiše kako se vrši distribucija posla.

Tipovi odredbi za for direktivu

private *(list)*	
firstprivate *(list)*	
lastprivate *(list)*	
reduction *(operator:list)*	(C/C++)
reduction *({operator | intrinsic_procedure_name}:list)*	(Fortran)
ordered	
schedule *(kind[,chunk_size)]*	
nowait	

Section direktiva

- Ovom direktivom se može postići da različite niti paralelno izvršavaju različite poslove, jer omogućava da se definiše više različitih regiona od koji će svaki biti izvršen od strane jedne od niti.
- Ona se sastoji od dve direktive
  - **# pragma omp sections** kojom se ukazuje na početak konstrukcije, i nekoliko
  - #**pragma omp section** direktiva kojima se označva svaka pojedina sekcija koja će se izvršavati paralelno sa ostalim.
    - Svaka sekcija mora biti strukturni blok koji ne zavisi od drugih sekcija.
    - Ako ima više sekcija nego niti, onda će neke (li sve) niti izvršavati više sekcija, ali će svaka sekcija biti izvršena tačno jednom.
    - Ako ima više niti nego sekcija, višak niti biće neupošljen.
    - Dodela posla nitima je zavisna od implementacije

sections/section direktiva sintaksa

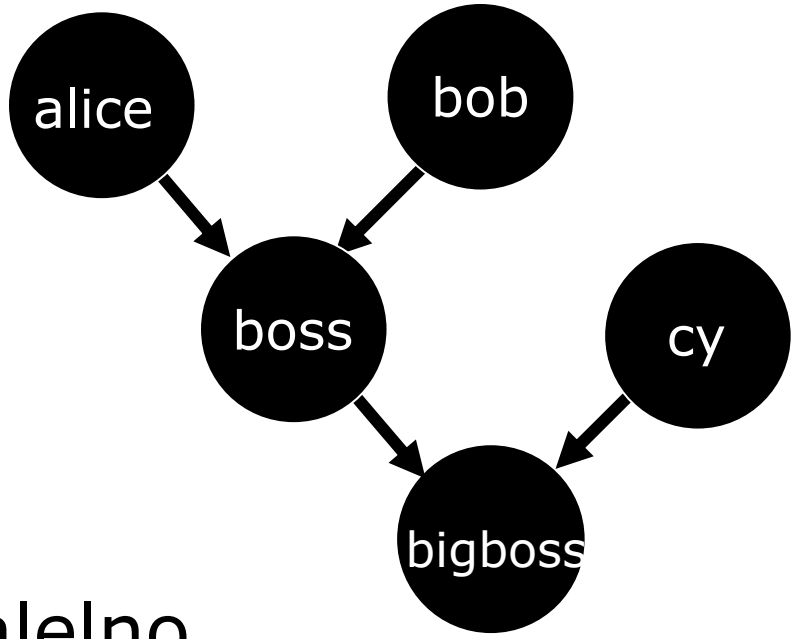
```
#pragma omp sections [clause[[,] clause]...]
    {
    [#pragma omp section ]
        structured block
    [#pragma omp section
        structured block ]
    ...
    }
```

- najčešće se koristi za paralelno izvršenje funkcija ili potprograma
  - prva section direktiva može biti izostavljena

paralelizam na nivou funkcija

```
a = alice();
b = bob();
s = boss(a, b);
c = cy();
printf ("%6.2f\n",
      bigboss(s,c));
```

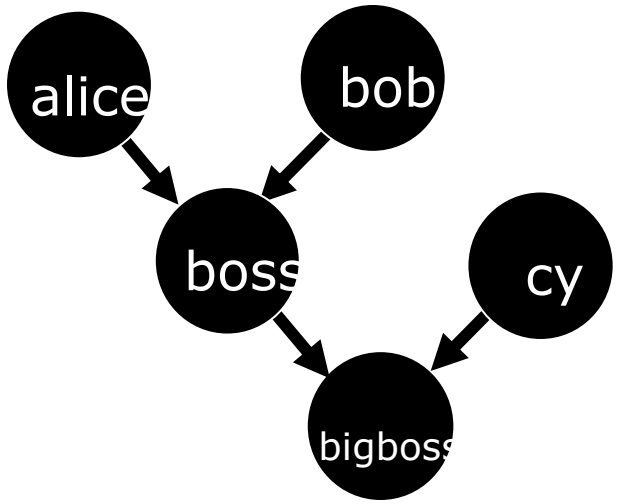
graf zavisnosti zadataka



alice,bob, i cy
se mogu izvršavati paralelno

Functional Level Parallelism sa sections dirktivom

```
#pragma omp parallel
{
#pragma omp sections
{
#pragma omp section  /* Optional */
    a = alice();
#pragma omp section
    b = bob();
#pragma omp section
    c = cy();
}
}
s = boss(a, b);
printf ("%6.2f\n",
          bigboss(s,c));
```



Primer2

```
#pragma omp parallel
{
   #pragma omp sections
   {
      #pragma omp section
        (void) funcA();

      #pragma omp section
        (void) funcB();
   } /*-- End of sections block --*/

} /*-- End of parallel region --*/
```

Ako je funkcija funcA (slično i funcB) oblika

```
void funcA()
{
   printf("In funcA: this section is executed by thread %d\n",
        omp_get_thread_num());
}
```

Izlaz iz programa bi mogao da bude oblika

```
In funcA: this section is executed by thread 0
In funcB: this section is executed by thread 1
```

odredbe uz sections

private *(list)*	
firstprivate *(list)*	
lastprivate *(list)*	
reduction *(operator:list)*	(C/C++)
reduction *({ operator | intrinsic_procedure_name }:list)*	(Fortran)
nowait	

Single direktiva

- Ovom direktivom se postiže da se strukturni blok izvršava od strane samo jedne niti.
  - Ona ne kaže koja je to nit, već samo da se taj blok izvršava sekvencijalno.
  - Druge niti čekaju na barijeri da se okonča izvršenje bloka koji se nalazi u okviru single direktive
  - Sintaksa

#pragma omp single *[clause[[,] clause]...]* *structured block*

Primer

- U sledećem primeru se koristi single konstrukcija da inicijalizuje deljivu promenljivu *a* :

```
#pragma omp parallel shared(a,b) private(i)
{
   #pragma omp single
   {
      a = 10;
      printf("Single construct executed by thread %d\n",
             omp_get_thread_num());
   }
   /* A barrier is automatically inserted here */

   #pragma omp for
   for (i=0; i<n; i++)
       b[i] = a;

} /*-- End of parallel region --*/

   printf("After the parallel region:\n");
   for (i=0; i<n; i++)
       printf("b[%d] = %d\n",i,b[i]);
```

- Implicitna barijera na kraju single konstrukcije veoma je važna.

Mogući izlaz iz programa za n=9 i 4 niti

- Bez barijere, neke niti bi mogle da krenu sa

```
Single construct executed by thread 3
After the parallel region:
b[0] = 10
b[1] = 10
b[2] = 10
b[3] = 10
b[4] = 10
b[5] = 10
b[6] = 10
b[7] = 10
b[8] = 10
```

* Klauzule (odredbe) koje se mogu koristiti uz single direktivu su

private *(list)*
firstprivate *(list)*
copyprivate *(list)*
nowait

Kombinovanje parallel direktive i direktiva za podelu posla

- Moguće je kombinovati parallel direktivu i direktive za podelu posla da bi se skratilo pisanje koda, tj. direktivu kojom de definiše paralelni region sa *for* i *sections* direktivama
- Npr.

```
#pragma omp parallel
{
  #pragma omp for
  for (.....)
}
```

je ekvivalentno sa

```
#pragma omp parallel for
  for (.....)
```

kombinovanje direktiva

Full version	Combined construct

#pragma omp parallel
{
#pragma omp for
for-loop
}
	#pragma omp parallel for
	for-loop

#pragma omp parallel
{
#pragma omp sections
{
[#pragma omp section]
structured block
[#pragma omp section
structured block]
...
}
}
	#pragma omp parallel sections
	{
	[#pragma omp section]
	structured block
	[#pragma omp section
	structured block]
	...
	}

Oblast delovanja direktiva

- FOR, SECTIONS i SINLGE direktive se moraju pojaviti unutar PARALLEL direktive
  - ali one ne moraju biti unutar iste funkcije

```
void main(void) {
   dothework();
   #pragma omp parallel
   {
      dothework();
   }
}
```

```
void dothework(void) {
   #pragma omp for
      for (ii=0; ii<N; ii++) {
         ...
      }
}
```