

Primljen / Received: 12.6.2017.
Ispravljen / Corrected: 17.10.2017.
Prihvaćen / Accepted: 6.11.2017.

Dostupno online / Available online: 10.1.2018.

Paralelni model kabela za grafičke kartice baziran na metodi konačno diskretnih elemenata

Autori:



Milko Batinić, mag.ing.aedif.
Sveučilište u Splitu
Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije
milko.batinic@gradst.hr



Doc.dr.sc. **Hrvoje Smoljanović**, dipl.ing.građ.
Sveučilište u Splitu
Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije
hrvoje.smoljanovic@gradst.hr



Prof.dr.sc. **Ante Munjiza**, dipl.ing.građ.
Sveučilište u Splitu
Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije
ante.munjiza@gradst.hr



Prof.dr.sc. **Ante Mihanović**, dipl.ing.građ.
Sveučilište u Splitu
Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije
ante.mihanovic@gradst.hr

Prethodno priopćenje

Milko Batinić, Hrvoje Smoljanović, Ante Munjiza, Ante Mihanović

Paralelni model kabela za grafičke kartice baziran na metodi konačno diskretnih elemenata

U radu je prikazana adaptacija kombinirane metode konačno diskretnih elemenata za paralelni model kablenskog elementa pomoću grafičkih kartica. Osnovni cilj je ubrzanje proračunskog vremena serijskog koda za jedan ili dva reda veličine. Razvijeno rješenje je implementirano unutar slobodno dostupnog FDEM Y koda. Mjerenje performansi razvijenog rješenja kao i diskusija o tome prikazani su na jednostavnim primjerima.

Ključne riječi:

metoda konačno diskretnih elemenata, kablenski element, GPU paralelnost

Preliminary report

Milko Batinić, Hrvoje Smoljanović, Ante Munjiza, Ante Mihanović

GPU based parallel FDEM for analysis of cable structures

A combined finite-discrete element method, adapted for the analysis of a parallel cable element model using graphic cards, is presented in the paper. The basic objective is to speed up sequential computation time by one or two orders of magnitude. The developed solution is implemented in the open-source FDEM Y code. Performance measurements for this solution are conducted on simple examples, and relevant discussions are made.

Key words:

finite-discrete element method, cable element, GPU parallelism

Vorherige Mitteilung

Milko Batinić, Hrvoje Smoljanović, Ante Munjiza, Ante Mihanović

Parallelmodell von Kabeln für Grafikkarten, basiert auf der Methode der finiten diskreten Elemente

In der Arbeit wird die Anpassung der kombinierten Methode der finiten diskreten Elemente für ein paralleles Kabelmodell anhand von Grafikkarten dargestellt. Der Schwerpunkt lag dabei auf der Beschleunigung der Berechnungszeit des Seriencodes um eine oder zwei Größenordnungen. Die entwickelte Lösung wurde innerhalb der frei zugänglichen FDEM Y Codes integriert. An einfachen Beispielen wurden die Messung der Leistungen der entwickelten Lösung sowie entsprechende Diskussionen dargestellt.

Schlüsselwörter:

Methode der finiten diskreten Elemente, Kabelelement, GPU-Parallelität

1. Uvod

Kabeli su učestalo korišteni nosivi elementi, prije svega u formiranju trodimenzionalnih konstrukcija kao što su ovješeni mostovi, dalekovodi, kabelski transportni sustavi, sidreni sustavi platformi i brodova itd. Prenose opterećenja isključivo uzdužnom silom i stoga se mogu smatrati jednostavnim nosivim elementima. S druge strane, pri računalnom modeliranju kabela nailazi se na značajne poteškoće zbog vrlo nelinearnog ponašanja. Mnogi numerički modeli kabela pokazuju značajnu numeričku nestabilnost ili nisku razinu točnosti. Modeli s previše pojednostavljenja ne pružaju točna rješenja koja čak ne opisuju točno ravnotežno stanje u konačno defomiranom obliku kabela.

1.1. Trenutačno stanje

Analiza kabela predmet je znanstvenog interesa već dugi niz godina. Braća Bernoulli, Leibnitz i Huygens pronašli su godine 1691. jednadžbu ravnotežne za nerastezljivi kabel ovješeni na svojim rubovima i pod utjecajem gravitacije. Leibnitz je upotrijebio teoriju infinitezimalnog računa kako bi izveo jednadžbu ove krivulje. Routh je 1891. riješio jednadžbu za simetrično ovješeni kabel za linearno elastični materijal, a 1981. godine Irvine prihvaća Lagrangeov pristup rješavanju nesimetričnog ovješene elastičnog kabela dobivajući izraz za matricu tangente krutosti. Treba napomenuti da se gore spomenuti pristup temelji na pretpostavci malih deformacija, što znači da su sile dobivene u odnosu na početnu konfiguraciju kabela. Također, analitičko rješenje za kabele poznato je samo za ograničen broj slučajeva opterećenja i rubnih uvjeta. Zbog navedenih razloga, uvriježeni pristup za analizu kabela su numeričke metode, u kojima se kabel diskretizira u manje elemente. Jednostavne jednadžbe kojima se modeliraju ti manji elementi sastavljaju se u veći sustav jednadžbi kojim se modelira cijeli problem. Među brojnim numeričkim metodama koje su predložene za modeliranje kabela, primjenjuju se dva pristupa [1].

Prvi pristup koristi polinomalne funkcije kao osnovnu funkciju za opis oblika i pomaka unutar elemenata kabela, što je standardni pristup u metodi konačnih elemenata. Najjednostavniji konačni element u ovom pristupu je dvočvorni pravocrtni element [2]. Taj element ima samo uzdužnu krutost i općenito se primjenjuje u kabelima s malim gradijentom zakrivljenosti kao što su kabeli za prednapinjanje. U slučaju labavih kabela s velikom zakrivljenosti, opisivanje njegove geometrije izvodi se velikim brojem konačnih elemenata; dakle, analiza postaje neučinkovita zbog velikog broja stupnjeva slobode.

Drugi numerički model u ovom pristupu je multičvorni izoparametarski element, koji se dobiva dodavanjem više čvorova konačnom elementu. Elementi su obično s tri ili četiri čvora, te koriste parabolne ili kubične interpolacijske funkcije. Kako bi se osigurao kontinuitet zakrivljenosti između dva konačna elementa, obično se dodaju rotacijski stupnjevi slobode [3]. Ova vrsta konačnih elemenata mnogo bolje opisuje geometriju kabela, ali

za veliki gradijent pomaka i zakrivljenosti također je potrebno imati velik broj konačnih elemenata.

Drugi pristup koristi analitičko rješenje za opisivanje oblika i pomaka unutar elemenata kabela uzimajući u obzir vrstu primijenjenog opterećenja duž kabela [4-9]. Ova skupina numeričkih modela uključuje parabolni elastični element koji ima široku primjenu zbog svoje jednostavnosti i predstavlja proširenje Irvinova modela, koji su razvili Ahmadi-Kashani i Bell [10]. Glavna značajka tih numeričkih modela je da za vrstu i oblik opterećenja iz kojeg su izvedene osnovne funkcije pokazuju poklapanje s analitičkim rješenjem s vrlo malim, pa čak i jednim konačnim elementom, dok za drugačiji tip opterećenja on zahtijeva mnogo veći broj konačnih elemenata.

U novije vrijeme, jedna od metoda koja je pronašla široku primjenu u analizi inženjerskih konstrukcija je kombinirana metoda konačnih diskretnih elemenata (eng. *finite-discrete element method* - FDEM) koju je razvio Munjiza [11-13].

1.2. FDEM numerički algoritam

Kombinirana metoda konačnih diskretnih elemenata (FDEM) kombinira prednosti metode konačnih i diskretnih elemenata. FDEM je razvijen uglavnom za simulaciju pojave i razvoja pukotina uzimajući u obzir veliki broj (od nekoliko tisuća do milijun i više) deformabilnih elemenata koji se mogu naći u međusobnom kontaktu, uslijed čega od jednog diskretnog elementa kroz proces raspucavanja može nastati njih više. U okviru ove metode deformabilna su tijela (diskretni elementi) diskretizirana s trokutnim (2D) ili tetraedarskim (3D) konačnim elementima. Materijalna nelinearnost je uzeta u obzir zakonitošću ponašanja materijala u Gausovim točkama, a pojava i razvoj pukotina modelirani su kontaktnim elementima koji su implementirani između mreže konačnih elemenata. Materijalni model ponašanja u kontaktnim elementima je opisan u relaciji naprezanje-pomak. Međudjelovanje diskretnih elemenata opisano je algoritmom potencijalnih kontaktnih sila. Metoda koristi eksplicitnu numeričku integraciju jednadžbi gibanja u vremenu. Svi prethodno navedeni numerički algoritmi implementirani su u numerički kod Y2D (za analizu ravninskih problema) i Y3D (za analizu prostornih problema).

FDEM je pronašao široku primjenu u različitim područjima znanosti kao što su analiza konstrukcija [14-16], mehanika stijena [17, 18], pomorsko inženjerstvo [19], biomedicinsko inženjerstvo [20] i strojarstvo [21].

Razvijeni su sekvencijalni CPU algoritmi za FDEM probleme, uključujući algoritam Munjiza-NBS [22] i MR [23] za detekciju konakata, kombinirani model razmazanih i diskretnih pukotina za analizu raspucavanja [24], algoritam potencijalnih kontaktnih sila za simulaciju kontaktnog međudjelovanja [25] i algoritmi za integraciju jednadžbi gibanja u vremenu [11]. Svi navedeni algoritmi su dio numeričkog paketa Y2D za analizu dvodimenzionalnih odnosno Y3D za analizu trodimenzionalnih problema.

FDEM je računalno iznimno zahtjevna metoda te je stoga vrlo teško analizirati probleme vrlo velikih dimenzija na sekvencijal-

nom procesorskom hardveru. Zbog toga su istraživani različiti tipovi paralelnih rješenja uključujući; paralelno računalo s podijeljenom memorijom [26, 27], paralelna računala s raspodijeljenom memorijom [28], hardverski neovisni virtualni paralelni strojni okvir za FDEM [29], MPI statička [30] i dinamička dekompozicija domene problema [31].

Sve paralelnosti koriste hardver na sličan način: simultano izvršavanje posla na mnogim jezgrama procesora koji rade na određenom dijelu domene s komunikacijom između njih. Istražena je upotreba grafičkih procesora (GPU) za DEM [32] i 2D FEM/DEM [33] analize. GPU paralelnost povezanog FEM/DEM pristupa (CDEM) opisali su Wang i sur. [33], no paralelnost problema FDEM-a pomoću samog GPU-a je manje istražena

1.3. GPU hardverski i softverski model

Grafička (vizualna) jedinica za obradu podataka – grafička kartica (eng. *Graphic (Visual) Processing Unit* – GPU) [34] je hardver koji je u svojim začetima služio za stvaranje računalnih slika, ali je postao suvremeni dodatak procesorima (CPU) za računalno intenzivne operacije. NVidia je prvi put koristila oznaku GPU 1999 za svoj model grafičke kartice GTS 256 [34], ali sada izraz uključuje sve povijesne hardvere od začetaka grafičkih kartica 80-ih do danas. Ovisno o proizvođaču i specifičnoj arhitekturi, zajednički osnovni blokovi (BBB) GPU-a mogu se promatrati kao:

- jednostavni procesor (SPP) – sastoji se od jedinice s pomičnim zarezom (FPU) i aritmetičke jedinice (ALU) – koristi se za jednostavne algebarske operacije
- DPP – procesori dvostruke preciznosti; 64-bitni operandi s pomičnim zarezom
- SFU – procesor posebnih funkcija – procesor za matematičke transcendentne funkcije – $\sin()$, $\cos()$, \log , \exp . itd)
- LD / ST – jedinica za učitavanje i pohranjivanje podataka

Različiti broj specifičnih BBB-a čine streaming multiprocesore (SMM) (slika 1.), klasteri procesora koji dijele pojedine dijelove čipa. Čip kartice GTX 980 se sastoji od 16 multiprocesora, od ko-

jih je svaki ima po četiri kvadranta s 32 SPP, 8 LD / ST, 8 SFU i 2 DPP jezgre.

Memorija GPU-a (hardverski parametri za Maxwell GTX 980 karticu, prema [35]) podijeljena je na:

- registre
- zajednički L1 / Texture cache (brza privremena memorija)
- zajedničku memoriju
- lokalnu memoriju
- read only Cache (memorija kojoj je sadržaj dostupan samo za čitanje)
- globalnu memoriju.

Registri tipa memorije su dostupni samo onim procesorima koji je trenutno koriste; zajednička memorija se dijeli među procesorima unutar jednog multiprocesora, a globalna memorija se dijeli među svim multiprocesorima.

Kôd koji se pokreće paralelno na GPU procesorima zove se kernel. Svaka kopija izvršena na jednom od procesora naziva se nit (thread), te predstavlja egzaktnu kopiju kernela, koja se istodobno pokreće s drugim kopijama – nitima.

Da bi se u potpunosti koristila paralelnost transfera podataka, niti trebaju imati usklađen pristup memoriji, pa se stoga grupiraju u snopove (warps) – 32 niti čine jedan snop (warp). Upravljanje svim operacijama vezanim za paralelizaciju je složen zadatak, te su stoga razvijena različita sučelja za paralelno programiranje aplikacija. U ovom radu je korišten NVidia softver, iako postoje *open source* rješenja (OpenCL).

U nastavku ovog rada predstavljen je FDEM GPU paralelni algoritam za analizu kabela, koji koristi masivnu paralelnost koju nude moderne računalne grafičke kartice i prednosti kombiniranja tehnika diskretnih elemenata s FEM-om.

Svi proračuni u ovom radu provedeni su s NVidia GTX 980 karticom – Maxwell arhitekturom (hardverski parametri kartice prikazani na slici 1.)

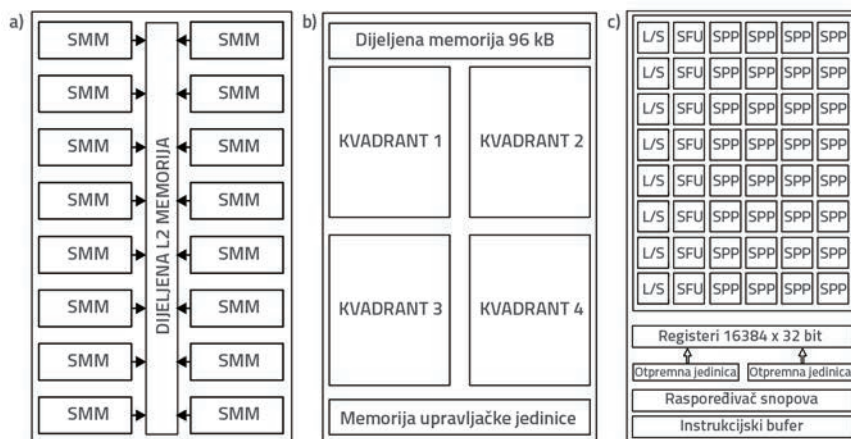
Prema saznanju autora, ne postoje slični kodovi za paralelni proračun kabela.

2. GPU algoritam

U ovom je poglavlju prikazan numerički algoritam za analizu kabela [36] prilagođen za paralelni proračun na grafičkim karticama, GPU-ima. Diskretizacija sustava i detaljne informacije vezane za nosivi sustav kao i vremensku integraciju jednadžbe gibanja prikazane su u nastavku.

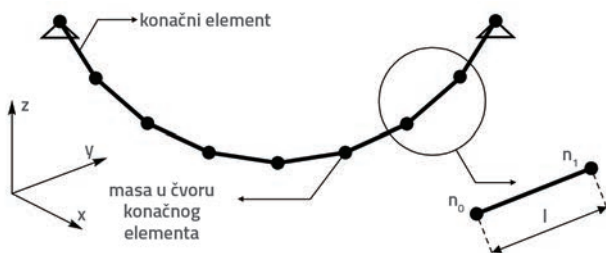
2.1. Diskretizacija

Unutar ovog algoritma kabel se diskretizira s dvočvornim konačnim elementima koji mogu prenijeti samo uzdužne sile, tj. sile u smjeru svoje osi [36]. Masa kabela



Slika 1. Maxwell GTX 980: a) tlocrt čipa; b) tlocrt multiprocesora; c) tlocrt jednog kvadranta multiprocesora, prema [35]

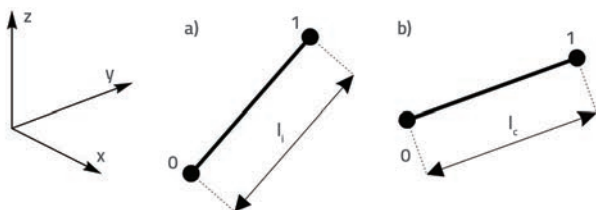
je koncentrirana u čvorove konačnih elemenata, kao što je prikazano na slici 2.



Slika 2. Diskretizacija kabela

2.2. Nosivi sustav

Dvočvorni konačni elementi omogućuju samo uzdužna naprezanja, tj. naprezanja u smjeru svoje osi [36]. Geometriju konačnog elementa definiraju dva čvorova, kao što je prikazano na slici 3. Svaki čvor je opisan njegovim globalnim početnim i trenutnim kartezijskim koordinatama (x, y, z).



Slika 3. Početne i trenutne koordinate čvorova konačnog elementa

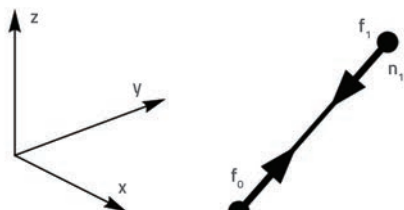
Na temelju poznatih koordinata čvorova u početnoj i trenutnoj konfiguraciji, (slika 3.), moguće je odrediti početnu l_i i trenutnu l_c duljinu konačnog elementa. Uzdužna deformacija unutar svakog konačnog elementa dobiva se prema izrazu (1):

$$\varepsilon = (l_c - l_i) / l_i \tag{1}$$

Koristeći linearno viskozno-elastično ponašanje materijala, dobiveno je odgovarajuće naprezanje prema izrazu (2):

$$\sigma = E\varepsilon + \bar{\mu}\dot{\varepsilon} \tag{2}$$

gdje je E modul elastičnosti, $\bar{\mu}$ koeficijent prigušenja $\dot{\varepsilon}$ brzina promjene deformacije.



Slika 4. Ekvivalentne čvorne sile uslijed uzdužnog naprezanja konačnog elementa

Ekvivalentne čvorne sile u smjeru osi konačnog elementa (slika 4.) dobivene su prema

$$f_0 = f_1 = \sigma A \tag{3}$$

gdje je A površina poprečnog presjeka kabela.

2.3. Vremenska integracija jednadžbe gibanja

Oblik kabela i njegov položaj u prostoru u bilo kojem trenutku definiraju se trenutačnim koordinatama čvorova konačnih elemenata x_i , gdje je i oznaka stupnja slobode čvora. Svaki čvor ima tri stupnja slobode koji se odnosi na translacije u smjeru x, y i z. Slično tome, polja brzina i ubrzanja definirana su pomoću čvorne brzine v_i i čvorovog ubrzanja a_i [11-13].

Na svaki čvor i svaki stupanj slobode primjenjuje se eksplicitna vremenska shema integracije. Čvorne sile od aksijalnog nosivog mehanizma i vanjskih opterećenja, poput gravitacijskog opterećenja ili nekog drugog vanjskog opterećenja, dodaju se sve zajedno i dobiva se ukupna čvorna sila povezana sa svakim stupnjem slobode. Dinamička ravnoteža za svaki stupanj slobode stoga je dana kao

$$m_i a_i = f_i \tag{4}$$

gdje je m_i masa odgovarajućeg čvora.

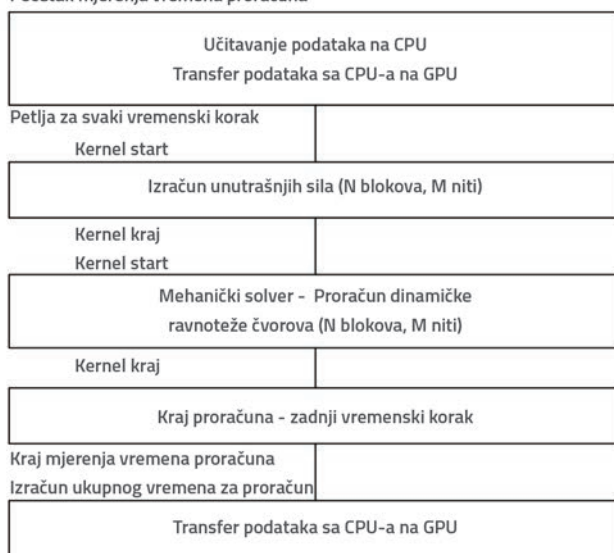
Za integraciju navedene jednadžbe upotrijebljena je metoda središnjih razlika za svaki stupanj slobode. Shema integracije se može formulirati pomoću izraza (5):

$$v_{i,t+\Delta t/2} = v_{i,t+\Delta t/2} + \Delta t f_{it} / m_i \tag{5}$$

$$x_{i,t+\Delta t} = x_{i,t} + \Delta t v_{i,t+\Delta t/2}$$

gdje je Δt vremenski korak.

Početak mjerenja vremena proračuna



Slika 5. Dijagram toka predloženog paralelnog algoritma za kabel

Zbog prirode paralelnih algoritama, modeli s velikim brojem elemenata prikazuju bolje performanse od modela s manjim brojem elemenata, te je stoga usvojena diskretizacija s najjednostavnijim dvočvornim konačnim elementima učinkovita za proizvoljnu geometriju.

Shematski dijagram toka koji opisuje ukupni numerički postupak prikazan je na slici. 5. Treba istaknuti da predloženi numerički postupak ne zahtijeva slaganje matrice krutosti i matrice masa, što ga čini pogodnim za paralelno programiranje.

S programerskoga gledišta, podaci predložene formulacije algoritma pohranjeni su u 1D polja (array) i koriste vrstu zapisa podatka *float* (plivajući zarez) (usporedba s tipom podatka dvostruke točnosti *double* je dana). Svaki 1D vektor usklađen je na 384-bitu radi postizanja optimalnog vremena pristupa globalnoj memoriji. Podaci prema kojima imaju pristup sve kopije programa - niti, pohranjeni su u dijeljenoj memoriji, a za sve ostale slučajeve dijeljenih podataka, smješteni su u lokalnoj registar-memoriji. Da bi se smanjio ukupni broj zapisa po niti (threadu), uvedene su lokalne privremene varijable koje se koriste za proračun više globalnih varijabli. Početna geometrija sustava se računa na procesoru, CPU-u (duljina elementa, lista čvornih veza), te se potom podaci prenose iz CPU-a na grafičku karticu - GPU. Nakon što su izvršeni svi proračuni za sve vremenske korake, rezultati se kopiraju iz GPU-a na CPU i zapisuju u izlazne datoteke.

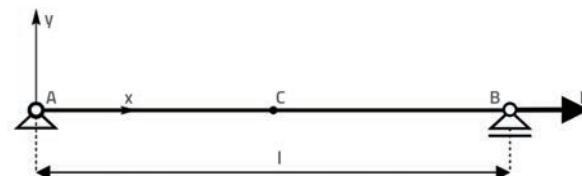
3. Numerički rezultati

3.1. Primjer 1 - Verifikacija algoritma

Slika 6. prikazuje početnu geometriju jednostavnog lančanog sustava s fiksnim osloncem u točki A i kliznim osloncem u točki B, s koncentriranom silom $F = 60000$ N. Ukupna duljina lančanice je $l = 1000$ m. Proračun se izvodi za masu lančanice $m = 5$ kg / m', presjek površine $A = 25$ cm², modul elastičnosti $E = 210000$ MPa i Poissonov koeficijent $\nu = 0$. Analitičko rješenje za vertikalni pomak u točki C dobiva se kad je sustav u ravnoteži, prema izrazu (6):

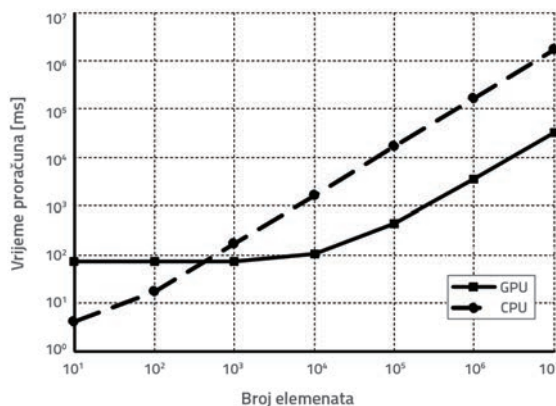
$$y = \frac{1}{H} \int_0^x \int_0^x q dx dx + C_1 x + C_2 \quad (6)$$

Za definirana svojstva i rubne uvjete (slika 6.) analitičko rješenje za vertikalni pomak u točki C je $y_c = -100$ m.



Slika 6. Početna geometrija sustava

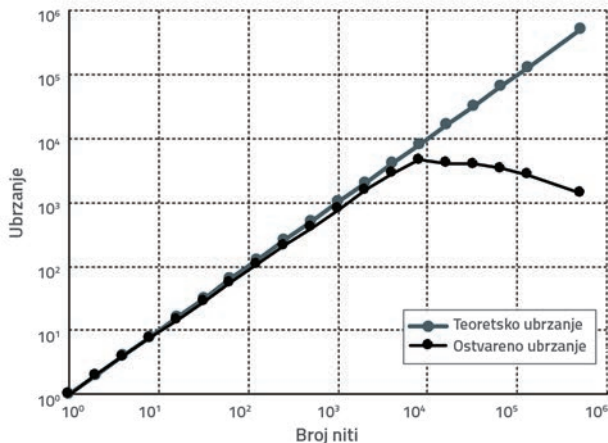
Usporedba vertikalnog pomaka točke C za analitičko rješenje, komercijalni softverski paket SCIA Engineer [37] i predloženi paralelni algoritam s različitim gustoćom mreže prikazani su u tablici 1. Analitičko rješenje vertikalnog pomaka u točki C ne uključuje elastično produljenje kabela, međutim materijalna svojstva presjeka su odabrana na način da je pomak zanemariiv (red veličine 1 mm). Usporedba brzina proračuna za sekvencijsku implementaciju Y-koda na računalnoj konfiguraciji (Intel Core i7 procesor 3,75 GHz, 16 GB RAM, PCI Express 2.0) i paralelni GPU kod za različite veličine mreže konačnih elemenata prikazana je na slici 7. Za male veličine mreže GPU paralelni kod je sporiji, zbog prirode GPU-a (vremenski trošak višestruke inicijalizacije kernela nad malim setom podataka), postupno postižući ubrzanje u odnosu na sekvencijski kod do 80 puta za sustave s 10 milijuna elemenata. Iz tablice 1. relativna pogreška za dobivene rezultate s komercijalnim paketom SCIA Engineer je manja u usporedbi s FDEM-om. Međutim, prednosti predloženog numeričkog modela uključuju geometrijsku nelinearnost (velike rotacije i velike pomake), dok se linearni model materijala lako može proširiti tako da uključuje različite vrste materijalnih nelinearnosti. Osim toga, može se uključiti detekcija kontakta i kontaktnih sila te lom kabela.



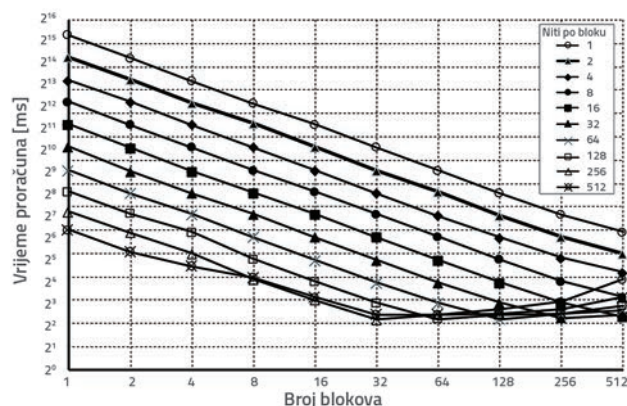
Slika 7. Usporedba vremena proračuna za sekvencijski CPU i paralelni GPU algoritam

Tablica 1. Vertikalni pomak točke C - usporedba rezultata i relativne pogreške

Rješenje	Vertikalni pomak u točki C [m]	Apsolutna vrijednost relativne pogreške [%]
Analičko prema (6)	100	0
Komercijalni FEM paket [37] - 1000 elemenata	100,73	0,73
Algoritam - 100 elemenata	96,24	3,76
Algoritam - 1000 elemenata	98,27	1,73
Algoritam - 10000 elemenata	99,96	0,04
Algoritam - 100000 elemenata	99,99	0,01

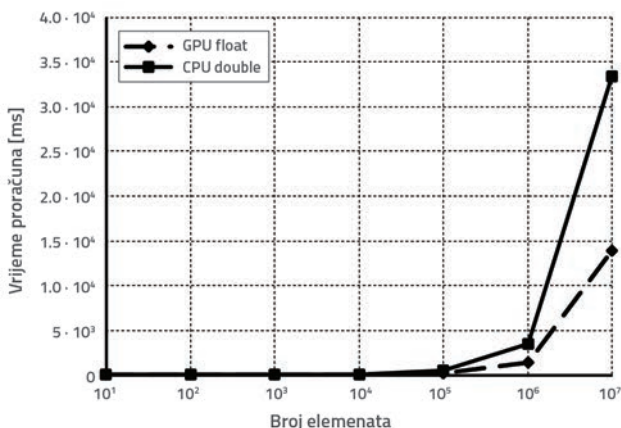


Slika 8. Usporedba vremena proračuna paralelnog algoritma za različit broj blokova i niti po bloku



Slika 9. Relativno ubrzanje vremena proračuna paralelnog koda u usporedbi s vremenom proračuna sa samo jednom niti i jednim blokom na GPU

Zbog primijenjene strategije programiranja, optimalna učinkovitost u pogledu korištenja hardvera može se postići pomoću 256 blokova i 64 niti po bloku (slika 8.). Ukupno ubrzanje ograničeno je resursima koji se koriste po jednoj niti, a maksimalna brzina postiže se korištenjem 16384 niti. (slika 9.)



Slika 10. Vrijeme proračuna za paralelni algoritam za tip podataka float i double

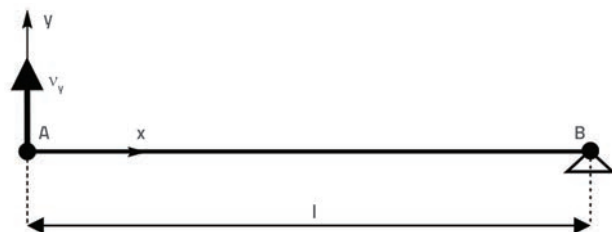
Usporedba vremena proračuna za različite vrste podataka prikazana je na slici 10. Zbog broja jezgri koje mogu vršiti proračun za pojedini tip podatka (*float* i *double*), uporabom tipa podatka *float* brzina proračuna je do tri puta veća u odnosu na tip *double*.

3.2. Propagacija vala - dinamička analiza

Primjer 2. prikazuje dinamičke mogućnosti razvijenog algoritma. Točka A prikazana na slici 11. izložena je oslciatornoj brzini prema izrazu

$$v_y = 2 \cos(\omega t)$$

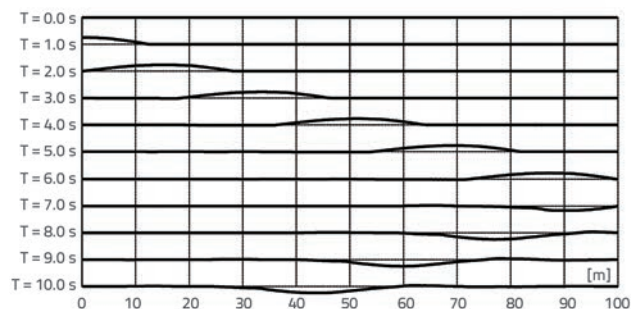
za vremenski interval $t = 2,0$ s, gdje je $\omega = 0,5 \pi$.



Slika 11. Propagacija vala - početno stanje sustava

Proračun se izvodi za parametre: masa $m = 1$ kg/m', površina presjeka $A = 25$ cm², modul elastičnosti $E = 210\,000$ MPa i Poissonov koeficijent $\nu = 0$.

Duljina sustava je $l = 100,0$ m, dok je duljina jednog konačnog elementa $0,01$ m, za ukupno 10000 konačnih elemenata. Izveden je proračun za milijun vremenskih koraka, svaki 10^{-5} s, za ukupno vrijeme simulacije od $t = 10,0$ s.



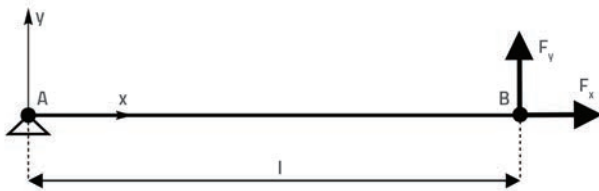
Slika 12. Propagacija vala u kabelu

Slika 12. prikazuje pomak kabela u globalnom Y smjeru za različite vremenske korake. Val koji putuje brzinom od 16,6 m/s nastao oscilatornim gibanjem u točki A, u vremenskom koraku $t = 6,0$ s, udara u fiksni oslonac u točki B, nakon čega se vraća prema točki A.

3.3. Sidrenje - statička analiza kabela

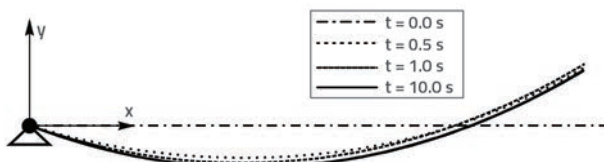
Primjer 3 prikazuje postupak nalaska ravnotežnog oblika za statičku ravnotežu. Sustav za sidrenje prikazan na slici 13. fiksiran

je u točki A, a točka B je slobodna. U točki B djeluju horizontalna $F_x = 1000$ kN i vertikalna $F_y = 600$ kN sila na početno stanje sustava.



Slika 13. Sidrenje - Početna geometrija sustava

Svojstva za kabel su dana kao: masa $m = 5$ kg / m', poprečni presjek $A = 25$ cm², modul elastičnosti $E = 210\,000$ MPa i Poissonov koeficijent $\nu = 0$, duljine sustava $l = 500,0$ m, dok je duljina diskretizacije jednog elementa $0,01$ m, za ukupno 50000 konačnih elemenata. Proračun se vrši za dvadeset milijuna vremenskih koraka, svaki $5 \cdot 10^{-6}$ s, za ukupno vrijeme simulacije od $t = 10$ s.



Slika 14. Ravnotežno stanje sustava za sidrenje

Tablica 2. Koordinate točke B za različito simulacijsko vrijeme

Vrijeme [s]	Globalna X koordinata [m]	Globalna Y koordinata [m]
0	500,00	0,00
0,5	478,57	50,57
1	476,08	48,30
2	475,51	47,13
5	475,49	46,42
10	475,49	46,36

Položaj sustava u različitim vremenskim koracima prikazan je na slici 14. Konvergencija algoritma na statičku ravnotežu sustava za 1.0 sekundu simulacijskog vremena (dva milijuna vremenskih koraka) iznosi 1% za smjer X i 5% za smjer Y. Tablica 2. daje konvergenciju sustava za određeno vrijeme simulacije.

4. Zaključak

Ovaj rad prikazuje paralelni GPU algoritam za statičku i dinamičku analizu kabela. Algoritam se temelji na kombiniranoj metodi konačno diskretnih elemenata uz korištenje dvočvornih konačnih elemenata bez rotacije. U radu se ukratko navode informacije vezane uz strategiju paralelnosti i implementacije na GPU. Predloženi algoritmi implementiraju se u postojeći paket otvorenog koda "YFDEM". Valjanost modela je prikazana na jednostavnim testovima usporedbom rezultata dobivenih predloženim algoritmom s poznatim analitičkim i numeričkim rezultatima.

Za male sustave koji sadrže nekoliko stotina elemenata, razvijen algoritam u usporedbi sa serijskom implementacijom je sporiji, pri čemu se postupno poboljšava i postiže ubrzanje od 80 puta za sustave s nekoliko milijuna elemenata.

Za sustave koji zahtijevaju velik broj elemenata, predloženi paralelni model vrlo dobro funkcionira i može se koristiti u slučajevima kada se koriste veliki sustavi kabela. Dodatna dinamička svojstva koja su prikazana u primjerima 2 i 3 čine ga prikladnim za specifične inženjerske probleme, uključujući propagaciju kod velikih distribucijskih mreža, sidrenja *offshore* konstrukcija i analizu velikih konstrukcija od kabela.

Također; pucanje elemenata, materijalna nelinearnost, detekcija kontakta i interakcija unutar elementa kabela i drugih tipova FDEM elemenata se lako može implementirati, pružajući simulacijski alat za širok spektar istraživačkih područja, uključujući razna polja građevinarstva, pomorsko inženjerstvo, strojarstvo itd.

LITERATURA

- [1] Coarita, E., Flores, L.: Nonlinear Analysis of Structures Cable - Truss, International Journal of Engineering and Technology 7 (2015) 3, pp. 160-169.
- [2] Tibert, G.: Numerical analyses of cable roof structures, KTH, Structural Engineering, Superseded Departments, KTH, 1999.
- [3] Thai, H.T., Kim, S.E.: Nonlinear static and dynamic analysis of cable structures, Finite Elements in Analysis and Design, 47 (2011) 3, pp. 237-246.
- [4] Pipkin, A.C.: Catenary deformations of inextensible networks, Journal of Engineering Mathematics, 28 (1994) 5, pp. 401-406.
- [5] Suzuki, Y., Miyata, E.S., Iverson, S.C.: Static analyses of the triangular running skyline system: A three-dimensionally movable logging cable system, Computers & Structures, 60 (1996) 4, pp. 579-592.
- [6] Huang, Y., Lan, W.: Static analysis of cable structure, Applied Mathematics and Mechanics, 27 (2006) 10, pp. 1425-1430.
- [7] Andreu, A., Gil, L., Roca, P.: A new deformable catenary element for the analysis of cable net structures, Computers and Structures, 84 (2006) 29-30, pp. 1882-1890.
- [8] Kiureghian, A., Sackman, J.L.: Tangent Geometric Stiffness of Inclined Cables Under Self-Weight, Journal of Structural Engineering, 131 (2005) 6, pp. 941-945.
- [9] Lopez-Garcia, O., Carnicero, A., Torres, V.: Computation of the initial equilibrium of railway overheads based on the catenary equation, Engineering Structures, 28 (2006) 10, pp. 1387-1394.
- [10] Cuomo, M., Greco, L.: A finite element cable for the analysis of cable nets, Meccanica strutture, pp. 1-11, 2009

- [11] Munjiza, A.: The combined Finite-Discrete Element Method, John Wiley & Sons, 2004. UK, <https://doi.org/10.1002/0470020180>
- [12] Munjiza, A., Knight, E. E., Rougier, E.: Computational Mechanics Of Discontinua. John Wiley & Sons, 2011. UK, <https://doi.org/10.1002/9781119971160>
- [13] Munjiza, A., Rougier, E., Knight, E. E.: Large strain Finite element method a practical course, John Wiley & Sons, 2015. UK
- [14] Uzelac, I., Smoljanović, H., Peroš, B.: A computationally efficient numerical model for a dynamic analysis of thin plates based on the combined finite-discrete element method, Engineering Structures, 101 (2015) pp. 509-517, <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2015.07.054>
- [15] Zivaljić, N., Smoljanović, H., Nikolić, Z.: A combined finite-discrete element model for RC structures under dynamic loading, Engineering Computations, 30 (2013) 7, pp. 982-1010.
- [16] Smoljanović, H., Živaljić, N., Nikolić, Ž.: A combined finite-discrete element analysis of dry stone masonry structures, Engineering Structures, 52 (2013), pp. 89-100, <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2013.02.010>
- [17] Grasselli G., M. O. K. C. E.: An Example of Realistic Modelling of Rock Dynamics Problems : FEM / DEM Simulation of Dynamic Brazilian Test on Barre Granite, Rock Mechanics and Rock Engineering 43 (2010) 6, pp. 707-716.
- [18] Zhao, Q., Lisjak, A., Mahabadi, O., Liu, Q., Grasselli, G.: Numerical simulation of hydraulic fracturing and associated microseismicity using finite-discrete element method, Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 6 (2014) 6, pp. 574-581.
- [19] Bai, X., Avital, E.J., Munjiza, A., Williams, J.J. R.: Numerical simulation of a marine current turbine in free surface flow, Renewable Energy, 63 (2014), pp. 715-723, <https://doi.org/10.1016/j.renene.2013.09.042>
- [20] Xu, D., Kaliviotis, E., Munjiza, A., Avital, E., Ji, C., Williams, J.: Large scale simulation of red blood cell aggregation in shear flows, Journal of Biomechanics, 46 (2013) 11, pp. 1810-1817.
- [21] Kruggel-Emden, H., Rickelt, S., Stepanek, F., Munjiza, A.: Development and testing of an interconnected multiphase CFD-model for chemical looping combustion, Chemical Engineering Science, 65 (2010) 16, pp. 4732-4745.
- [22] Munjiza, A., Andrews, K.: NBS contact detection algorithm for bodies of similar size, International Journal for Numerical Methods in Engineering, 149 (1998), pp. 131-149, [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-0207\(19980915\)43:1<131::AID-NME447>3.0.CO;2-S](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-0207(19980915)43:1<131::AID-NME447>3.0.CO;2-S)
- [23] Munjiza, A., Rougier, E., John, N.W.M.: MR linear contact detection algorithm, International Journal for Numerical Methods in Engineering, 66 (2006) 1, pp. 46-71.
- [24] Munjiza, A.: Combined single and smeared crack model in combined finite discrete element analysis, International Journal for Numerical Methods in Engineering, 44 (1999) 1, pp. 41-57.
- [25] Munjiza, A., Andrews, K.R.F.: Penalty function method for combined finite - discrete element systems comprising large number of separate bodies, International Journal for numerical methods in engineering, 49 (2000) , pp. 1377-1396, [https://doi.org/10.1002/1097-0207\(20001220\)49:11<1377::AID-NME6>3.0.CO;2-B](https://doi.org/10.1002/1097-0207(20001220)49:11<1377::AID-NME6>3.0.CO;2-B)
- [26] Owen, D.R.J., Feng, Y.T.: Parallelised finite/discrete element simulation of multi-fracturing solids and discrete systems, Engineering Computations, 18 (2001) 3/4, pp. 557-576.
- [27] Useche, J., Albuquerque, E. L.: Transient dynamic analysis of shear deformable shallow shells using the boundary element method, Engineering Structures, 87 (2015), pp. 1-7, <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2015.01.006>
- [28] Hussain, H., Ur, S., Malik, R., Hameed, A., Ullah, S., Bickler, G., Min-allah, N., Bilal, M., Zhang, L., Yongji, W., Ghani, N., Kolodziej, J., Zomaya, A.Y., Xu, C., Balaji, P., Vishnu, A., Pinel, F., Pecero, J. E., Kliazovich, D., Bouvry, P., Li, H., Wang, L., Chen, D., Rayes, A.: A survey on resource allocation in high performance distributed computing systems, PARALLEL COMPUTING, 39 (2013) 11, pp. 709-736.
- [29] Lei, Z., Rougier, E., Knight, E.E., Munjiza, A.: A framework for grand scale parallelization of the combined finite discrete element method in 2D, Computational Particle Mechanics, 1 (2014) 3, pp. 307-319.
- [30] Schiava D'Albano, G.G.: Computational and Algorithmic Solutions for Large Scale Combined Finite-Discrete Elements Simulations, QMUL, Dissertation, 2013. UK
- [31] Lukas, T., Schiava D'Albano, G.G., Munjiza, A.: Space decomposition based parallelization solutions for the combined finite-discrete element method in 2D, Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 6 (2014) 6, pp. 607-615.
- [32] Zhang, L., Quigley, S.F., Chan, A.H.C.: A fast scalable implementation of the two-dimensional triangular Discrete Element Method on a GPU platform, Advances in Engineering Software, 60-61 (2013), pp. 70-80, <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2012.10.0>
- [33] Wang, L., Li, S., Zhang, G., Ma, Z., Zhang, L.: A GPU-Based Parallel Procedure for Nonlinear Analysis of Complex Structures Using a Coupled FEM / DEM Approach, 2013 (2013) iii, pp. 1-16.
- [34] N.G.: GeForce 256 and RIVA TNT Combiners How to best utilize the per-pixel operations using OpenGL on NVIDIA Graphics Processors, Processors, pp. 1-28, 1999.
- [35] NVIDIA GeForce GTX 980, pp. 1-32, 2014. https://international.download.nvidia.com/geforce-com/international/pdfs/GeForce_GTX_980_Whitepaper_FINAL.PDF
- [36] Divić, V., Simulacije krajnjih graničnih stanja pod djelovanjem vjetra metodom konačno-diskretnih elemenata 2014., doktorska disertacija, Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije, Split
- [37] SCIA Engineer 2017, <https://www.scia.net/> accessed 05.05.2017