

Andriјanić T., Dragović N., Todosiјеvić M. 2012. *Labour engagement optimization in planning the execution of river regulation works on the Jelašnička river*. Bulletin of the Faculty of Forestry 106: 29-40.

Тијана Андријанић
Нада Драговић
Мирјана Тодосијевић

UDK: 630*384.3:65.012.2
UDK: 630*384.3:005.821
Оригинални научни рад
DOI: 10.2298/GSF1206029A

ОПТИМИЗАЦИЈА АНГАЖОВАЊА РАДНЕ СНАГЕ ПРИ ПЛАНИРАЊУ ИЗВОЂЕЊА РАДОВА НА РЕГУЛАЦИЈИ ЈЕЛАШНИЧКЕ РЕКЕ

Извод: Пројекат је подухват који се састоји од скупа међусобно повезаних активности које захтевају време и ресурсе за своје извршење. Код изградње подужних и попречних објеката за уређење бујичних сливова често се дешава да су потребни ресурси (радна снага, материјал, механизација и финансијска средства) ограничени у смислу физичке доступности због чега смо суочени са проблемом њихове ефикасне искоришћености. Овај рад разматра проблем планирања извођења радова на регулисању бујичног водотока Јелашничке реке, са циљем минимизације продужења времена трајања пројекта услед ограничености ресурса. При планирању реализације овог пројекта ресурс који је ограничен је ангажовање радне снаге. Применом хеуристичке методе, односно модификованог облика Gray Kidd-овог алгорита уз подршку софтвера MS Projecta извршена је расподела ресурса у циљу добијања оптималног ангажовања радне снаге. Ова метода као улазне елементе користи податке добијене СРМ методом мрежног планирања. Кроз више итерација померањем некритичних, а потом и критичних активности, извршена је оптимизација ангажовања радне снаге уз минимално продужење времена трајања пројекта. Према томе, примињене методе су се показале као ефикасне за решавање проблема планирања пројекта са ограниченим ресурсима.

Кључне речи: бујични водоток, оптимизација, планирање радне снаге, СРМ метода, Gray Kidd-ов алгоритам

дипл.инж. Тијана Андријанић, Универзитет у Београду - Шумарски факултет, Београд (tijana.andrijanic@sfb.bg.ac.rs)

др Нада Драговић, редовни професор, Универзитет у Београду - Шумарски факултет, Београд
мр Мирјана Тодосијевић, асистент, Универзитет у Београду - Шумарски факултет, Београд

LABOUR ENGAGEMENT OPTIMIZATION IN PLANNING THE EXECUTION OF RIVER REGULATION WORKS ON THE JELAŠNIČKA RIVER

Abstract: A project is a task comprising a set of interrelated activities requiring time and resources for their execution. It is often the case that during the construction of longitudinal and cross section structures for the regulation of a torrential catchment the required resources (labour, materials, mechanization, and finances) are often limited and because of that we face the problem of their efficient use. This paper deals with the problem of planning the execution of river regulation works on the Jelašnička River with the aim to minimize the time extension due to limited resources. In the planning phase of project realization labour force is the limited resource. Heuristic techniques, i.e. the Gray-Kidd algorithm with the use of MS Project software were applied in the distribution of resources for the purposes of optimal labour engagement. This method uses the data acquired by the CPM method of network planning as input elements. Through more iterations, by moving noncritical and then critical project activities, the minimal extension of project duration was achieved by engaging more labour force. Therefore, the proposed heuristic and CPM method performed well in resolving the resource-constrained project scheduling problem.

Key words: torrential stream, optimization, labour planning, CPM method, Gray-Kidd algorithm

1. УВОД

Пројекти уређења горњих и доњих делова бујичних сливова изградњом објеката представљају подухват који се састоји од међусобно повезаних активности које за своје извршење захтевају ресурсе и време. Пројекат се састоји од N активности које треба да се заврше у циљу минимизације неке функције циља, најчешће времена трајања пројекта (Moumene, Ferland, 2009). Свака активност пројекта има специфицирано време трајања t_{ij} и за извршење захтева A_k количину ресурса. У пракси је често количина ресурса неопходна за извођење радова ограничена и суочени смо са проблемом њихове ефикасне искоришћености.

Постоје две основне категорије планирања ресурса: нивелисање ресурса и алокација ресурса (Vandelon i *et al.*, 1994). Проблем нивелисања ресурса проистиче у случају када постоји довољно расположивих ресурса и пожељно је да се они искористе равномерно. Услов је да време завршетка пројекта остане исто, што се постиже померањем само активности са временском резервом. Проблем алокације ресурса, јавља се када су ресурси ограничени са циљем да време завршетка пројекта буде што ближе дужини критичног пута, уз померање активности све док ресурси не достигну вредност расположивог броја.

Други случај је честа појава код уређења бујичних водотока, где су ограничавајући фактори за планирање ресурса фронт рада, уске и стрме долине, тј. локација места где се изводе радови.

У овом раду је разматран проблем планирања извођења радова на бујичном водотоку Јелашничкој реци услед ограничености ангажовања радне снаге. Применом методе критичног пута (Critical Path Method - CPM) мрежног планирања и хеуристичког алгоритма извршена је оптимизација ангажовања радне снаге уз минимално продужење времена трајања пројекта.

2. МАТЕРИЈАЛ И МЕТОД РАДА

Оптимизација ангажовања радне снаге је извршена применом алгоритма хеуристичке методе чији су улазни елементи добијени методом критичног пута мрежног планирања (Petrić, 1987). У питању је модификовани облик Gray Kidd-овог алгоритма јер његова доследна примена, није могућа при решавању проблема минимизације трајања реализације пројекта за уређење бујичних водотока са ограниченим ангажовањем радне снаге (Dragović, 2001).

Овај алгоритам користи предности и аналитичких и хеуристичких метода. У аналитичке методе се убрајају методе мрежног планирања и управљања као што је CPM метода која обезбеђује корисне информације за ефикасно планирање пројекта као што су критичан пут, укупна и слободна временска резерва (Kastor, Sigasoulis, 2009). На основу ових информација доносилац одлуке усваја бољу стратегију оптимизације времена и доступних ресурса са циљем постизања најранијег времена завршетка пројекта (Sathish, Ganesan, 2011). Недостатак CPM методе је то што не разматра ограничења ресурса (Chen, Weng, 2009) што се може превазићи коришћењем хеуристичких метода које омогућују проналажење прихватљивих решења.

Модификовани облик Gray Kidd-овог алгоритма настоји постепеном приближавању оптималном решењу и састоји се из седам корака (Dragović, 2001):

- одредити могуће трајање реализације пројекта без разматрања ангажовања радне снаге;
- поставити некритичне активности у положај најранијег почетка и анализирати добијени хистограм потреба у радној снази;
- извршити померање почетка некритичних активности за одређени временски интервал и испитати да ли се новодобијеним хистограмом постиже вредност ограниченог ресурса;
- извршити продужење трајања некритичних активности за одређени интервал укупне временске резерве;
- испитати добијени хистограм и утврдити критичне активности чијим продужењем трајања се остварује највеће смањење ангажовања радне снаге;
- продужити трајање критичних активности за потребан број временских јединица, којим се остварује вредност ограниченог ангажовања радне снаге;
- извршити контролу вредности ограниченог ангажовања радне снаге за добијено трајање реализације пројекта.

Параметри коришћени у раду (Petrić, 1986):

$$\begin{aligned}
 t_i^{(0)} &= \max_i \{t_i^{(0)} + t_{ij}\}; t_i^{(0)} = 0, \dots \dots \dots (1) \\
 t_j^{(0)} &= t_i^{(0)} + t_{ij} \\
 t_i^{(1)} &= \min_j \{t_j^{(1)} - t_{ij}\}; t_n^{(1)} = Tp \\
 t_i^{(1)} &= t_j^{(1)} - t_{ij} \\
 (S_{ij}) &= t_j^{(1)} - t_i^{(0)} - t_{ij} \\
 (S_{ij}) &= t_j^{(0)} - t_i^{(0)} - t_{ij}
 \end{aligned}$$

где су $t_{ij} = tr$ - време трајања активности, $t_i^{(0)}$ - најранији почетак активности, $t_j^{(0)}$ - најранији завршетак активности, $t_i^{(1)}$ - најкаснији почетак активности, $t_j^{(1)}$ - најкаснији завршетак активности, Tp - време трајања реализације пројекта, Tkp – најдуже време реализације пројекта (дужина критичног пута), (S_{ij}) - укупна временска резерва, (S_{ij}) - слободна временска резерва, (S_{ij}) - независна временска резерва, Ak - количина ресурса k , i_k - интензитет k – тог ресурса (потребна количина ресурса по јед. времена), $w_r^{(k)}$ - потреба ангажовања радника

3. ОПТИМИЗАЦИЈА АНГАЖОВАЊА РАДНЕ СНАГЕ

У раду је разматран проблем који настаје у случају када различите активности за своје извршење захтевају ангажовање радника исте категорије у истом временском интервалу. Циљ овога рада је минимизација времена трајања радова уз претпоставку да су радници неопходни за извршење радова доступни у ограниченом броју, што се математички може приказати:

$$\min Tp, \dots \dots \dots (2)$$

уз ограничења

$$Tp > Tkp, \dots \dots \dots (3)$$

$$i_r^{(k)} \cdot t_r = w_r^{(k)}; \quad r \in N, k \in M$$

$$\sum_{r \in N} i_r^{(k)} \leq Ak$$

Проблем је решен применом модификованог облика Gray Kidd-овог алгоритма и метода мрежног планирања на примеру реализације пројекта за изградњу регулације у бујичном водотоку Јелашничкој реци (Dragović, 2001). Алгоритам као улазне елементе користи податке о временској резерви који се добијају CPM методом.

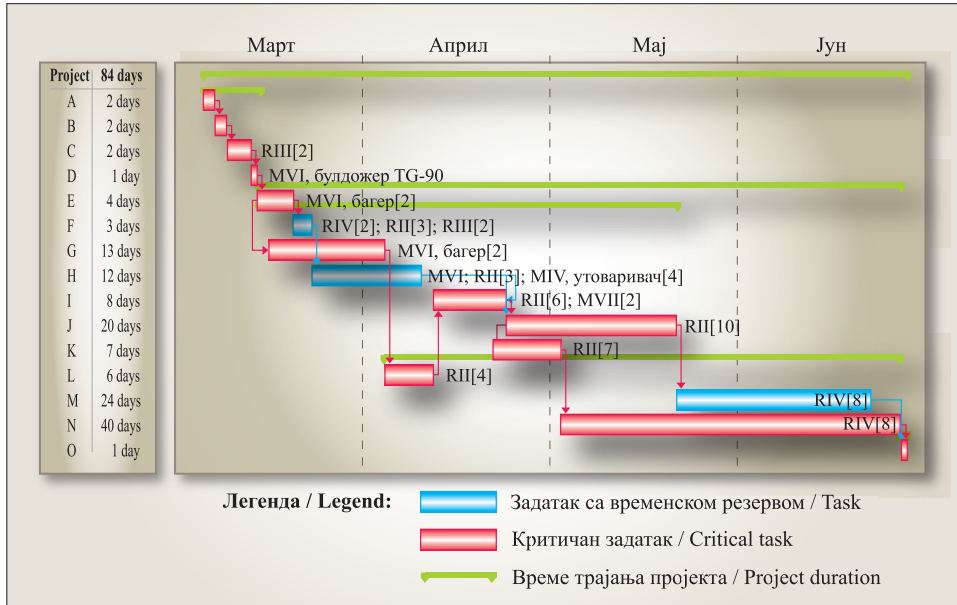
Полази се од прве фазе CPM методе анализе структуре, која започиње састављањем списка активности и утврђивање редоследа извођења радова и њихове логичке међузависности, сходно потреби да се одређени објекти и локације заштите у што краћем временском периоду (табела 1).

Време трајања активности t_{ij} одређено је на основу података из Привремених техничких норми учинка и времена и из искуствених норми ЈВП „Србија Воде”.

Табела 1. Списак активности са временом трајања и међусобним везама
Table 1. Activity list with the time line and interrelated activities

Ознака актив. Label of activities	Опис активности Description of activities	Трајање Duration	Међусобне везе Predecessors	Тип везе Connection type
A	Отварање градилишта	2	-	-
B	Допрема машина и израда приступачних путева	2	A	FS
C	Сеча стабала	2	B	FS
D	Чишћење терена	1	C	FS
E	Машински ископ земље за темеље објеката	4	D	FS
F	Ручни ископ земље III и IV катег. у уском рову	3	E	FS
G	Машински ископ земље за регулацију	13	E	SS кашњење 2 дана time lag 2 days
H	Довоз земље са позајмишта	12	F	FS
I	Насипање материјала са набијањем иза објеката	8	L	FS
J	Планирање околних површина земљишта	20	I	FS
K	Затрављивање	7	J	SS
L	Полагање не-тканог геотекстила	6	G	FS
M	Набавка жице и камена, постављање, формирање и пуњење габионских корпи	24	J	FS
N	Набавка жице и камена, постављање, формирање и пуњење рено мадраца	40	K	FS
O	Технички пријем објекта	1	N	FS

Спровођењем анализе времена CPM методе добија се динамика одвијања активности које су повезане везама finish-to-start (FS) и start-to-start (SS), што је графички приказано у виду гантограма уз подршку софтвера MS Projecta (слика 1). Сумирањем времена трајања појединих активности добија се време трајања реализације пројекта - T_p .



Графикон 1. Динамички план одвијања радова (гантограм) на уређењу Јелашничке реке применом MS Projecta (пре оптимизације)

Diagram 1. Programme of Works (Gantt chart) for the Jelašnička River regulation using MS Project (prior to the optimization)

Потребе за радницима као и прекорачење у броју радника за сваки временски интервал (дан) трајања пројекта приказан је на хистограму (графикон 2). Активности код којих је утврђено прекорачење броја радника неопходно је одложити или продужити њихово време трајања, тако да не дође до продужетка T_p . За допустиви број јединица временске резерве врши се померање некритичних активности, код којих је временска резерва $(St)_{ij} > 0$ при чему долази до промена броја ангажованих радника по дану. Анализом новодобијеног хистограма утврђује се да ли се постиже вредност ограниченог ресурса. Уколико се та вредност постиже процес оптимизације се ту завршава. У супротном, утврђују се критичне активности код којих је $(St)_{ij} < 0$ и на којима је интензитет ангажовања радне снаге највећи. Продужењем времена трајања тих активности остварује се вредност ангажовања ограниченог броја радне снаге.

4. РЕЗУЛТАТИ ИСТРАЖИВАЊА

Временском анализом гантограма за пројекат изградње регулације Јелашничке реке установљено је време трајања реализације пројекта које износи 84 дана (графикон 1).

Активности овог пројекта за извршење захтевају раднике различите категорије чији се потребан и расположив број читава са хистограма (слика 2). Временски интервали у којима је предвиђено извршење једне или више активности које користе исти тип ограниченог ресурса приказан је у табели 2.

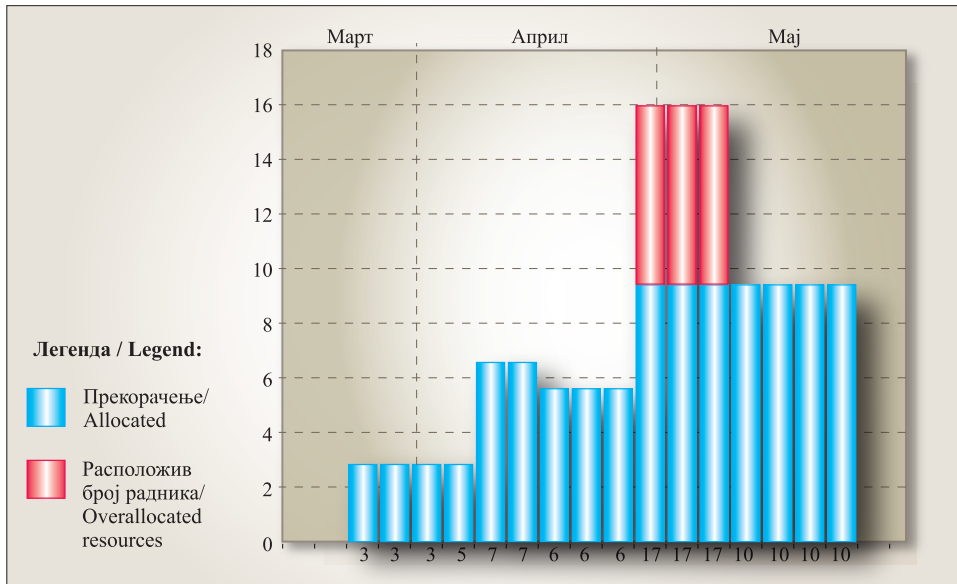
Табела 2. Ограничење ангажовања радника за временске интервале и активности пројекта
Table 2. Limitation in labour engagement for time intervals and project activities

Врста активности (време трајања) Activity (duration)	Број радника (структура и квалификација) Number of labour (structure and qualifications)	
	потребан required	расположив available
Н – довоз земље са позајмишта (27. марта-13. априла)	4 MIV	2 MIV
Е - машински ископ земље за темеље објеката G - Машински ископ земље за регулацију (20. марта-26. марта)	4 MVI	2 MVI
Ј – Планирање околних површина земљишта К – Затрављивање (28. априла-6. маја)	17 RII	10 RII
М – набавка жице и камена, постављање, формирање и пуњење габионских корпи N – набавка жице и камена, постављање, формирање и пуњење рено матраца (26. маја-26. јуна)	16 RII	15 RII

Проблем ограниченог ангажовања радне снаге решен је померањем активности које нису на критичном путу, односно њиховим продужењем за допустиви број временских јединица укупне временске резерве.

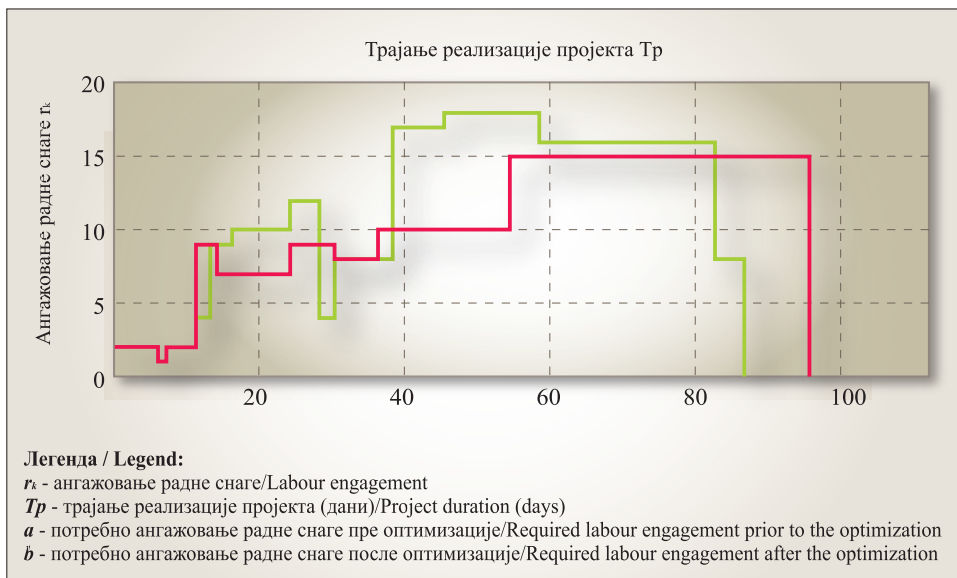
Трајање активности Н је продужено за 6 дана, а активности М за 3 дана, чиме је број радника у временско интервалу од 27. марта до 13. априла, односно 26.маја до 26. јуна сведен на расположив број. Да би се задовољила ограничења ресурса и у преосталим временским интервалима извршено је померање критичних активности. У следећој итерацији почетак активности G је одложен након завршетка активности Е (веза између активности је умерена из start-to-strat и finish-to-finish) због ограничења радника MVI што је утицало на продужење времена трајања пројекта за 2 дана. Након тога, извршено је продужење времена трајања активности Ј и К за по 9 дана.

Након завршене оптимизације, укупно продужење времена реализације пројекта је 11 дана, а број радника одговара расположивом броју (графикон 1). Применом метода за оптимизацију задовољен је постављен критеријум циља: минимизација продужења трајања пројекта са ограниченим ангажовањем радне снаге (графикон 3).



Графикон 2. Хистограм ангажовања радне снаге (RII) у посматраном периоду (пре оптимизације)

Diagram 2. Labour engagement histogram (RII) for the given period (prior to the optimization)



Графикон 3. Минимизација трајања пројекта при ограниченом ангажовању радне снаге

Diagram 3. Minimization of project duration with the limited labour

5. ДИСКУСИЈА

Реализација пројекта подразумева одвијање активности (послова) које за извршење захтевају ресурсе различите категорије (обновљиви, необновљиви, ду-пло ограничени, делимично ограничени) (Kolisch, Padman, 2001; Hartmann, Briskorn, 2010). Уколико је било која категорија ресурса доступна у количини мањој од неопходне за обављање посла, јавља се проблем познат у литератури као планирање пројекта услед ограничености ресурса.

Проблем планирања пројекта услед ограничености ресурса могуће је решити коришћењем различитих оптимизационих техника (Oguz, Bala, 1994). Оптимизација помоћу техника математичког програмирања за већину пројеката је непрактична услед великог броја променљивих и ограничења (Abe yasinghe *et al.* 2001). Једноставније и у том смислу ефикасније методе које се користе за алокацију ограничених ресурса на активности пројекта су хеуристичке методе (Al-Jibouri, 2002).

Постоји више хеуристичких метода међу којима и оне које користе разна приоритетна правила (Kolisch, 1996) на основу којих се одређује приоритет активности за извршење.

Khattab и Choobineh (1991) упоређују приоритетна правила која представљају функцију различитих атрибута активности пројекта, односно времена (трајања), захтеваних ресурса и локације активности у мрежи. Поменути аутори за постизање минималног времена трајања пројекта предлажу процедуру SEARCH која комбинује шест различитих приоритетних правила.

Једно од правила познато је као „minimum slack first (MINSLK)” (Gray Kidd-ов алгоритам) и даје приорит активностима на основу њиховог најранијег и најкаснијег времена почетка (Lee, 2007). Применом овог алгоритма могуће је извршити оптималну расподелу ограничених ресурса у функцији времена (Petrić, 1987). Оптимизацију ресурса који се користе при изградњи објеката за уређење бујичних водотока могуће је извршити применом модификованог облика Gray Kidd-овог алгоритма (Dragović, 2001).

У проучаваној литератури, проблему планирања пројектима услед ограничености ресурса се углавном приступа са теоријског аспекта, при чему је конкретних примера примене веома мало. Посебно је изражен недостатак примене ових метода за оптимизацију уређења бујичних сливова и заштиту земљишта од ерозије. Овај рад доприноси наведеној области применом одговарајућих оптимизационих метода са практичним примером оптимизације ангажовања радне снаге на примеру регулisaња корита Јелашничке реке применом модификованог Gray Kidd-овог алгоритма.

На примеру регулације Јелашничке реке, показано је како се применом СРМ методе врши планирање активности пројекта, које троше одређено време и ресурсе за своје извршење. У циљу рационализације технолошког процеса тежило

се што већој паралелизацији радова, што је за последицу имало прекорачење ограниченог броја радника. Ограничење ресурса код извођења радова на регулацији Јелашничке реке односило се на грађевинске машине, односно раднике који су били ангажовани за рад са њима, као и неквалификоване раднике за планирање и затрављивање површина. Како би се пројекат завршио без додатног ангажовања ресурса, примењено је приоритетно правило „продужење некритичних, а потом и критичних активности” (праћећи кораке модификованог Gray Kidd-овог алгорита). На тај начин је у циљу задовољења постављеног ограничења, прво искоришћена временска резерва, а потом је продужено трајање активности које не располажу са временском резервом а имају највеће потребе за радном снагом. Као резултат добијено је продужење времена трајања пројекта за 11 дана, док је број радника сведен на расположив број.

5. ЗАКЉУЧАК

Радови на изградњи објеката у кориту бујичних водотока захтевају ангажовање радника различите структуре и квалификације. Ангажовање радника неопходних за реализацију појединих активности пројекта није увек могуће у одговарајућем броју и у одређеном временском периоду. Разлог томе су ограничене могућности предузећа које изводи радове као и карактеристике бујичних токова, које често представљају ограничавајући фактор приликом планирања реализације пројекта. Недостатак ових ресурса за последицу има продужење времена трајања пројекта. Из тог разлога је извршена оптимизација ангажовања радне снаге применом CPM методе и модификованог облика Gray Kidd-овог алгорита водећи рачуна о томе да продужење трајања пројекта буде минимално. На основу CPM методе је израчунато време трајања реализације пројекта, а применом модификованог облика Gray Kidd-овог алгорита померање, односно продужење времена трајања активности пројекта. Примењени алгоритам је итеративни поступак који се заснива на постепеном приближавању оптималном решењу, односно минимизацији продужења времена трајања радова услед ограниченог ангажовања радне снаге.

У раду је на примеру планирања изградње регулације Јелашничке реке доказано да се применом метода мрежног планирања и хеуристичких метода постиже оптимално ангажовање радне снаге уз минимално продужење трајања пројекта.

Напомена: Овај рад је реализован у оквиру пројекта „Истраживање климатских промена на животну средину: праћење утицаја, адаптација и ублажавање” (43007), подпројекат бр. 16: „Социо-економски развој, ублажавање и адаптација на климатске промене”, који финансира Министарство за просвету и науку Републике Србије у оквиру програма Интегрисаних и интердисциплинарних истраживања за период од 2011 до 2014. године

ЛИТЕРАТУРА

- Abeyasinghe M.C.L, Greenwood D.J., Johansen D.E. (2001): *En efficient method for scheduling construction projects with resource constraints*, International Journal of Project Management 19, Pergamon, United Kingdom, (29-45)
- Al-jibouri S. (2002): *Effects of resource management regimes on project schedule*, International Journal of Project Management 20, Pergamon, United Kingdom, (271-277)
- Bandelloni M., Tucci M., Rinaldi R. (1994): *Optimal resource-levelling using non-serial dynamic programming*, European Journal of Operational Research 78, Elsevier, Amsterdam, (162-177)
- Chen P.-H., Weng H. (2009): *A two-phase GA model for resource-constrained project scheduling*, Automation in Construction 18, Elsevier, Amsterdam, (485-498)
- Dragović N. (2001): *Optimizacija realizacije projekta za uređenje bujičnih vodotoka*, doktorska disertacija u rukopisu, Univerzitet u Beogradu - Šumarski fakultet, Beograd
- Elsayed E.A., Nasrs N.Z. (1986): *Heuristics for resource-constrained scheduling*, International Journal of Production Research 24, Taylor and Francis, United Kingdom, (299-310)
- (2005): *Glavni projekat uređenja Jelašničke reke u selu Jelašnica – Opština Leskovac*, Šumarski fakultet, Beograd
- Hartmann S., Briskorn D. (2010): *A survey of variants and extensions of the resource constrained project scheduling problem*, European Journal of Operational Research 207, Elsevier, Amsterdam, (1-14)
- Kastor A., Siracoulis K. (2009): *The effectiveness of resource levelling tools for Resource Constraint Project Scheduling Problem*, International Journal of Project Management 27, Pergamon, United Kingdom, (493-500)
- Khattab M.M., Choobineh F. (1991): *A new approach for project scheduling with a limited resource*, International Journal of Production Research 21, Taylor and Francis, United Kingdom, (185-198)
- Kolisch R. (1996): *Efficient priority rules for the resource-constrained project scheduling problem*, Journal of Operations Management 14, Elsevier, Amsterdam, (179-192)
- Kolisch R., Padman R. (2001): *An integrated survey of deterministic project scheduling*, Omega: International Journal of Management Science 29, Pergamon, United Kingdom, (249-272)
- Lee L.-H. (2007): *Robust Preemptive Resource Assignment for Multiple Software Projects Using Parameter Design*, International Journal of Applied Science and Engineering 5 (2), Chaoyang University of Technology, Taiwan
- Moumene K., Ferland J.A. (2009): *Activity list representation for a generalization of the resource-constrained project scheduling problem*, European Journal of Operational Research 199, Elsevier, Amsterdam, (46-54)
- Oguz O., Bala H. (1994): *A comparative study of computational procedures for the resource constrained project scheduling problem*, Theory and Methodology, European Journal of Operational Research 72, Elsevier, Amsterdam, (406-416)
- Petrić, J. (1987): *Mrežno planiranje i upravljanje U: Operaciona ustraživanja*, Petrić, J., Naučna knjiga, Beograd (419-492)
- Sathish S., Ganesan K. (2011): *A simple approach to fuzzy critical path analysis in project networks*, International Journal of Scientific & Engineering Research 2, (1-6)

Tijana Andrijanić
Nada Dragović
Mirjana Todosijević

LABOUR ENGAGEMENT OPTIMIZATION IN PLANNING THE EXECUTION OF RIVER REGULATION WORKS ON THE JELAŠNIČKA RIVER

Summary

The projects on the regulation of torrential streams by the construction of longitudinal and cross section structures should be executed within the planned time and anticipated costs, and in accordance with the valid standards. The goal in the planning phase can vary depending on the available resources and time for execution. This paper deals with the problem of project realization when resources (labour) are limited.

Labour engagement optimization was performed on the example of the regulation works on the Jelašnička River comprising 15 activities requiring the labour force of different qualifications. The relationships among work tasks, the time for the project completion of 84 days, as well as any possible additional time required for the completion were determined by the CPM method with the use of MS Project software.

These elements are input data for the modified Gray-Kidd algorithm which is the heuristic approach to the problem. Through more iterations, by moving noncritical and then critical project activities, the minimal extension of 11 days was achieved by engaging the number of available labour. Thus, the required criterion was achieved - minimal time extension with a limited labour engagement.