ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 2002
Seria: AUTOMATYKA z. 134 Nr kol. 1554

Joanna JÓZEFOWSKA, Marek MIKA, Rafał RÓŻYCKI,
Grzegorz WALIGÓRA, Jan WĘGLARZ
Politechnika Poznańska

MAKSYMALIZACJA ZAKTUALIZOWANEJ WARTOŚCI NETTO W PROBLEMACH ROZDZIAŁU ZASOBÓW – PRZEGLĄD MODELI I ALGORYTMÓW

Streszczenie. Rozważane są problemy rozdziału zasobów z kryterium maksymalizacji zaktualizowanej wartości netto. Praca zawiera przegląd modeli i algorytmów dotyczących rozważanej klasy problemów szeregowania i jednocześnie jest próbą podsumowania aktualnego stanu badań w tym zakresie oraz ukazania na tym tle nowych kierunków badawczych.

MAXIMIZATION OF THE NET PRESENT VALUE IN PROJECT SCHEDULING – A SURVEY

Summary. Project scheduling problems with the maximization of the net present value (NPV) criterion are considered. The paper surveys models and algorithms concerning this class of problems. The state-of-the-art in this area and the future research directions are presented.

1. Wprowadzenie

Najczęściej rozpatrywanym kryterium w problemach rozdziału zasobów (ang. project scheduling) jest minimalizacja długości uszeregowania. W praktyce jednak nie mniej ważne są kryteria finansowe, a wśród nich maksymalizacja zaktualizowanej wartości netto (NPV). W tym przypadku dodatkowym parametrem, jaki rozważa się podczas szeregowania, są przepływy gotówkowe występujące podczas realizacji przedsięwzięcia. Rozróżnia się dwa typy przepływów gotówkowych: wypływy (m.in. koszty materiałowe, robocizny, wyposażenia itp.) oraz wpływy (np. zapłata za ukończone prace). Celem jest znalezienie takich chwil rozpoczęcia oraz zakończenia wykonywania czynności, dla których,

przy założonej stopie dyskontowej, NPV przedsięwzięcia osiąga wartość maksymalną, przy spełnieniu ograniczeń kolejnościowych i zasobowych. Ten NP-trudny problem jest w ostatnich latach intensywnie badany w wielu ośrodkach na świecie. Większość prac dotyczy deterministycznej wersji problemu, w której wszystkie dane, łącznie z przepływami gotówkowymi, są znane a priori. Wiele prac różni się pod względem przyjętych założeń dotyczących rozpatrywanego modelu oraz metod rozwiązywania. Niniejsza praca jest próbą podsumowania aktualnego stanu badań w tym zakresie i ukazania na tym tle nowych kierunków badawczych.

2. Opis problemu

W klasycznych problemach rozdziału zasobów można wyróżnić cztery podstawowe elementy: czynności, zasoby, ograniczenia kolejnościowe oraz kryterium szeregowania. Problem rozdziału zasobów polega na uszeregowaniu zbioru n czynności. W ogólności każda z czynności może być wykonana jednym z wielu alternatywnych sposobów. Sposób określa czas wykonywania, zapotrzebowanie na zasoby różnych kategorii oraz ewentualne przepływy gotówkowe, które mogą wystąpić zarówno na początku, w trakcie, jak i na końcu wykonywania czynności. Bardzo często wymogi technologiczne narzucają kolejność, w jakiej czynności powinny być wykonywane. W takim przypadku mówimy o istnieniu ograniczeń kolejnościowych pomiędzy czynnościami, które z reguły reprezentowane są za pomocą digrafu. Zasoby wykorzystywane podczas wykonywania czynności można podzielić na cztery podstawowe kategorie: odnawialne, nieodnawialne, podwójnie ograniczone [5] i częściowo odnawialne [6]. Ponadto zasoby mogą się różnić typem oraz liczbą dostępnych jednostek. Głównym kryterium finansowym w problemach rozdziału zasobów jest maksymalizacja NPV. Najogólniejsza postać wzoru, wg którego obliczana jest wartość NPV, jest następująca:

$$NPV = CF_0 + \sum_{t=1}^{\infty} CF_t (1+r)^{-t}, \tag{1}$$

gdzie CF_0 jest przepływem gotówkowym (z reguły wypływem) występującym na początku realizacji przedsięwzięcia, a CF_t jest przepływem gotówkowym występującym na końcu okresu t, r oznacza stopę dyskontową. NPV jest miarą regularną, gdy rozważane są wyłącznie dodatnie przepływy gotówkowe, a nieregularną w pozostałych przypadkach.

Ograniczenia kolejnościowe przedstawiane są za pomocą grafów o reprezentacji łukowej (AoA) lub wierzchołkowej (AoN). Zorientowana zdarzeniowo reprezentacja łukowa ułatwia zamodelowanie przepływów gotówkowych związanych z rozpoczęciem lub zakończeniem pewnej grupy czynności. Natomiast przedstawienie za jej pomocą przepływów gotówkowych związanych z rozpoczęciem lub zakończeniem pojedynczych czynności jest znacznie trudniejsze. W tym przypadku wygodniejsze jest stosowanie reprezentacji wierzchołkowej. Oczywiście możliwe jest powiązanie zalet obydwu reprezentacji przez wprowadzenie dodatkowych pozornych: czynności i zdarzeń. Jednakże rozwiązanie takie powoduje znaczny wzrost liczby wierzchołków i łuków w sieci, a co za tym idzie - również złożoności obliczeniowej problemu.

W literaturze dotyczącej problemu rozdziału zasobów w przeciągu ostatnich kilku lat pojawiło się wiele istotnych rozszerzeń modelu klasycznego. Kolejność wykonywania czynności może być określona inną - ogólniejszą metodą za pomocą tzw. minimalnych i/lub maksymalnych odstępów czasowych między czynnościami [3], za pomocą których można również zamodelować terminy gotowości i linie krytyczne dla poszczególnych czynności [9]. Ponadto istnieje kilka istotnych rozszerzeń dotyczących zasobów. Wystarczy wspomnieć wymienione wcześniej zasoby częściowo odnawialne [6], zasoby podzielne w sposób ciągły [51], czy też zasoby o parametrach, takich jak: dostępność i żądania zasobowe, zmiennych w czasie [45]. Inny rodzaj zasobów stanowią rozważane w [4] zasoby dedykowane, które w danej chwili mogą być przydzielone do wyłącznie jednej czynności. Opis pozostałych modyfikacji klasycznego modelu problemu rozdziału zasobów można znaleźć w wielu publikacjach z tego zakresu. Podsumowania dotyczące różnych aspektów tych badań można znaleźć między innymi w następujących pracach przeglądowych [7,11,17,22,24,25,29].

3. Przegląd literatury

W ostatnich latach problem rozdziału zasobów jest intensywnie badany w wielu ośrodkach na świecie. Maksymalizacja NPV jest, obok minimalizacji długości uszeregowania, najpopularniejszym kryterium. Klasyfikację i opisy różnych modeli płatności oraz kontraktów klient-wykonawca można znaleźć między innymi w [17] oraz [8]. W pracach przeglądowych [17,24,25] położono szczególny nacisk na podejścia, w których rozważane są

problemy rozdziału zasobów z kryteriami finansowymi. Podobnie jak to uczyniono w wymienionych pracach, w naszych rozważaniach wyróżnimy dwa przypadki: pierwszy, w którym omówimy problemy bez ograniczeń zasobowych, oraz drugi – z nałożonymi ograniczeniami zasobowymi.

3.1. Problem rozdziału zasobów bez ograniczeń zasobowych

Pierwszą pracą poświęconą maksymalizacji NPV była praca Russella z 1970 [35], w której rozważano zarówno dodatnie, jak i ujemne przepływy gotówkowe powiązane ze zdarzeniami reprezentowanymi przez węzły sieci AoA. Problem sformułowano jako problem programowania nieliniowego z wykładniczą funkcją celu i liniowymi ograniczeniami. Po rozwinięciu funkcji celu w szereg Taylora i w efekcie otrzymano problem programowania liniowego, do którego problemem dualnym jest problem przepływu w sieciach, w oparciu o który opracowano optymalny algorytm dla rozważanego problemu. Działanie tego algorytmu przedstawiono w przykładzie o małym rozmiarze. Grinold [15] rozwinął prace nad modelem Russella [35] i pokazał, że można go w bezpośredni sposób sprowadzić do problemu PL. Korzystając ze specjalnej struktury otrzymanego modelu, zaproponował dwa podejścia optymalne. Pierwsze rozwiązujące problem z ustaloną linią krytyczną dla całego przedsięwzięcia i drugie – parametryczne – rozwiązujące problem dla wszystkich potencjalnych linii krytycznych. Działanie obydwu podejść przedstawiono na małym przykładzie. W [12] użyto modelu Russella, dla którego opracowano uproszczony algorytm optymalny. Ponadto wykazano, że w ogólności, aby znaleźć uszeregowanie optymalne, wystarczy uszeregować zdarzenia z dodatnimi przepływami możliwie jak najwcześniej, a zdarzenia z przepływami ujemnymi możliwie jak najpóźniej, przy spełnieniu ograniczeń kolejnościowych. Dodatkowo pokazano, że jeśli nie występuje linia krytyczna dla całego projektu, to w niektórych przypadkach (gdy NPV<0) przedsięwzięcie będzie opóźniane w nieskończoność. Eksperyment obliczeniowy dla tego podejścia przeprowadzony na 250 losowo wygenerowanych problemach opisany jest w [16]. Natomiast Sepil [39] przedstawił słabe punkty i błędy znalezione w tym podejściu. W [13] również rozważano problem reprezentowany przez sieć AoA z przepływami gotówkowymi związanymi ze zdarzeniami. Dodatkowo przyjęto założenie, że wielkość przepływów gotówkowych zależy od czasu realizacji, co uzasadniono zmieniającymi się w czasie kosztami zasobów. Ponadto przyjęto system nagród za wcześniejsze i kar za późniejsze wystąpienie zdarzeń. Dla tego modelu zaproponowano algorytm symulowanego wyżarzania

z kilkoma różnymi strategiami i przetestowano go na 168 różnych problemach. Ten sam problem był rozważany w [41], gdzie do znajdowania optimów zaproponowano metodę podziału i ograniczeń. W [34] rozważano problem zamodelowany przy użyciu sieci AoN z minimalnymi i maksymalnymi odstępami czasowymi między czynnościami oraz dodatnimi i ujemnymi przepływami związanymi z czynnościami, do rozwiązywania którego zaproponowano algorytm podziału i ograniczeń ze strategią przeszukiwania w głąb. Jakość algorytmu została przebadana na podstawie obszernego eksperymentu na losowo wygenerowanych problemach. W pracy [23] omówiono model z płatnościami progresywnymi zależnymi od czasu i zastosowano dekompozycję Bendersa do jego rozwiązania. W [14] przedstawiono model z siecią AoA, w którym czynności mogą być wykonywane jednym z kilku alternatywnych sposobów, a przepływy są związane zarówno ze zdarzeniami, jak i czynnościami. Wielkości przepływów związanych z czynnościami zależą od sposobu wykonywania danej czynności. Dekompozycja Bendersa została użyta do znalezienia rozwiązań optymalnych dla tego problemu. Schwindt i Zimmermann [38] rozważają problem z minimalnymi i maksymalnymi odstępami czasowymi między czynnościami i proponują dla niego metodę największego wzrostu, która została przetestowana w oparciu o eksperyment obliczeniowy przeprowadzony dla losowo wygenerowanych instancji zawierających do 1000 czynności. W [49] rozważano problem, w którym z każdą czynnością związana jest deterministyczna, nierosnąca funkcja, liniowo zależna od czasu zakończenia czynności, określająca wartość przepływów gotówkowych związanych z tą czynnością. W modelu tym wszystkie płatności występują po zakończeniu czynności. Zaproponowano do jego rozwiązywania metodę pełnego przeglądu z wbudowaną procedurą stanowiącą rozszerzenie dokładnego algorytmu dla problemu z przepływami gotówkowymi wyrażonymi funkcjami niezależnymi od czasu. Jakość algorytmu została oceniona na podstawie eksperymentu obliczeniowego na losowo wygenerowanych danych.

3.2. Problem rozdziału zasobów z ograniczeniami zasobowymi

Problem rozdziału zasobów z kryterium maksymalizacji NPV, w przypadku gdy występują w nim ograniczenia zasobowe, jest NP-trudny [17], stąd większość prac na ten temat dotyczy algorytmów heurystycznych. Jednakże kilka prac poświęcono algorytmom dokładnym. Doersch and Patterson [10] sformułowali model programowania binarnego, w którym jedynym ograniczonym zasobem jest kapitał. Problem ten rozwiązano dokładnie za pomocą standardowego oprogramowania dla instancji składających się z 15-25 czynności.

Model ten został poszerzony w [44] o ograniczenia materiałowe oraz koszt. W [52] zaproponowano metodę podziału i ograniczeń ze strategią przeszukiwania w głąb dla modelu z siecią AoN i przepływami występującymi podczas wykonywania czynności. Przetestowano ją na 10 problemach składających się maksymalnie z 21 czynności. Icmeli i Erengüç [20] również opracowali metodę podziału i ograniczeń dla problemu z dodatnimi i ujemnymi przepływami związanymi z czynnościami projektu reprezentowanego siecią AoN. Baroum i Patterson [2] sformułowali model reprezentowany przez sieć AoN z wyłącznie dodatnimi przepływami związanymi z czynnościami. Zaproponowane przez nich podejście optymalne, oparte na metodzie podziału i ograniczeń, zostało przebadane w eksperymencie obliczeniowym opartym na 50 instancjach z tzw. zbioru danych Pattersona [32] oraz 40 instancjach wygenerowanych za pomocą generatora ProGen [26]. Największa przebadana instancja składała się z 51 czynności. De Reyck i Herroelen [34] rozważają problem z minimalnymi i maksymalnymi odstępami czasowymi między czynnościami oraz dodatnimi i ujemnymi przepływami gotówkowymi związanymi z czynnościami. Dla tego problemu zaproponowano podejście oparte na metodzie podziału i ograniczeń z przeszukiwaniem w głąb i przetestowano je na losowo wygenerowanych instancjach składających się z co najwyżej 50 czynności. W [50] rozważano problem z ustaloną linią krytyczną oraz dodatnimi i ujemnymi przepływami w formie płatności progresywnych występujących na końcu czynności. Dla tego problemu opracowano metodę podziału i ograniczeń z przeszukiwaniem w głąb. Jak dotąd nie opracowano jeszcze algorytmu dokładnego dla wersji problemu z wieloma sposobami wykonywania czynności.

Istnieje wiele podejść heurystycznych stosowanych do znajdowania suboptymalnych rozwiązań rozważanego problemu. Pierwsze heurystyki zaproponował w 1986 roku Russell [36]. Model opierał się na sieci AoA z dodatnimi i ujemnymi przepływami związanymi ze zdarzeniami. Dla tego modelu przedstawił 6 heurystyk: regułę losową polegającą na wyborze najlepszego z 50 wygenerowanych losowo rozwiązań, dwie (MINSLK/LAN i LFT) oparte na regułach priorytetowych oraz trzy oparte na rozwiązaniach dla problemu bez ograniczeń zasobowych. Heurystyki porównano między sobą w oparciu o eksperyment, z 80 różnymi instancjami składającymi się z 30 do 1461 czynności. W [42] rozważano problem z siecią AoN, gdzie wypływy były związane z początkiem każdej czynności, natomiast wpływy były realizowane w formie jednej płatności na końcu projektu. Zaproponowano dwie heurystyki bazujące na metodzie ścieżki krytycznej i przetestowano je na 550 instancjach testowych opartych na zbiorze danych Pattersona. Padman i Smith-Daniels [30] zastosowali

osiem różnych heurystyk w algorytmie zachłannym wykorzystującym informacje o zrelaksowanym (bez ograniczeń zasobowych) modelu problemu. Praca ta była następnie rozwijana w [43] i [31], gdzie przedstawiono kilka dodatkowych heurystyk. Wszystkie podejścia były testowane na tzw. zbiorze danych PSD opracowanym przez autorów, odpowiednio dla problemów składających się z maksymalnie 110, 230 i 1000 czynności. Icmeli i Erengüç [19] przedstawili dwie różne adaptacje algorytmu przeszukiwania tabu dla problemu z siecią typu AoN, gdzie przepływy związano z czynnościami i zastosowano funkcję kary dla uszeregowań kończących się później od założonego terminu. Obydwa podejścia przetestowano na 50 problemach ze zbioru Pattersona, a wyniki pokazały, że metody dają rozwiązania bliskie optymalnym. W [53] przedstawiono dziewięć różnych procedur stochastycznych i pokazano na podstawie eksperymentu obliczeniowego, przeprowadzonego na 1440 instancjach składających się z maksymalnie 20 czynności, że najlepsze wyniki dają algorytm symulowanego wyżarzania oraz dwie reguły priorytetowe: RPW i DCCFW. W pracy [1] Baroum i Patterson przedstawili kilka heurystyk opartych na regułach priorytetowych i porównali je na podstawie eksperymentu obliczeniowego, w którym największy problem składał się z 50 czynności. Otrzymane wyniki pokazały wyższość reguł wieloetapowych. Pinder i Marucheck [33] opracowali 10 nowych heurystyk i porównali je na drodze eksperymentu obliczeniowego z 7 innymi. W rozważanym modelu przyjęli sieć AoN i przepływy związane z czynnościami. Wyniki pokazały, że dwie spośród nowych heurystyk dają znacznie lepsze wyniki. Sepil i Ortaç [40] rozważali problem z płatnościami progresywnymi, dla którego zaproponowali trzy heurystyki, których jakość zweryfikowano na instancjach zawierających do 200 czynności. Zhu i Padman [54] zaproponowali algorytm przeszukiwania tabu. Problem z minimalnymi i maksymalnymi odstępami czasowymi był rozważany przez Neumanna i Zimmermanna [27]. W nielicznych pracach analizowano również wersję rozważanego problemu z wieloma sposobami wykonywania czynności. Sung i Lim [46] analizowali problem z ograniczeniami dotyczącymi zasobów odnawialnych oraz dostępności kapitału, dla którego zastosowali heurystykę dwufazową. Icmeli i Erengüç [21] przedstawili problem, w którym czas wykonywania czynności może ulec skróceniu dzięki przydzieleniu dodatkowych zasobów, i zaproponowali do jego rozwiązywania algorytm heurystyczny z wbudowaną regułą priorytetową. Ulusoy i Cebelli [47] połączyli w jednym modelu punkty widzenia klienta i wykonawcy. Zaproponowali algorytm genetyczny z podwójną pętlą, który poszukiwał rozwiązania "sprawiedliwego", czyli takiego, które zarówno dla klienta, jak i wykonawcy

różni się o taki sam procent od rozwiązania idealnego dla każdego z nich. Idealne rozwiązanie dla wykonawcy oraz klienta otrzymuje się odpowiednio, albo przez ustalenie wszystkich płatności na początku, albo na końcu projektu. W pracy [48] analizowany jest problem z wieloma sposobami wykonywania czynności oraz zasobami trzech kategorii: odnawialnymi, nieodnawialnymi i podwójnie ograniczonymi. Rozważane są cztery modele płatności: całość na końcu projektu, płatności związane ze zdarzeniami, okresowe płatności w określonych terminach oraz płatności progresywne. Jako algorytmu służącego znajdowaniu rozwiązań w tych czterech modelach użyto algorytmu genetycznego ze specjalnym operatorem krzyżowania. Özdamar i Dündar [28] również rozważają problem z wieloma sposobami wykonywania czynności. W ich modelu występują stałe i niezależne od sposobu wykonywania czynności wypływy gotówki, które związane są z czynnościami projektu oraz probabilistyczne wpływy gotówki. Do rozwiązania zaproponowano procedurę FLEX-PRO, która może być użyta zarówno do skonstruowania, jak i późniejszego przekonstruowania uszeregowania w zależności od aktualnego stanu finansów, które traktowane są jako zasób nieodnawialny. Algorytm przetestowano na zbiorze praktycznych danych związanych z rzeczywistym projektem oraz na danych hipotetycznych.

4. Wnioski i kierunki dalszych badań

Przedstawiony przegląd prac dotyczących różnych modeli i algorytmów służących do rozwiązywania różnych klas deterministycznych problemów rozdziału zasobów z kryterium maksymalizacji zaktualizowanej wartości netto wskazuje na rosnące zainteresowanie tymi problemami zarówno od strony teoretycznej, jak i praktycznej. Mnogość różnych podejść, modeli i metod rozwiązywania wskazuje, że jest to bardzo szeroki obszar badawczy, który jednak wymaga usystematyzowania. Szczególnie ważne wydaje się być zgromadzenie danych, mogących stanowić bazę danych z instancjami testowymi, które stanowiłyby cenne źródło dla badaczy, chcących porównać jakość opracowanych przez siebie algorytmów z innymi algorytmami. W związku z tym istotne jest też opracowanie algorytmów dokładnych dla wielu modeli, dla których nie zostały one jeszcze opracowane. Szczególnie można tu wyróżnić problemy rozdziału zasobów z wieloma sposobami wykonywania czynności, dla których do tej pory nie powstał żaden algorytm dokładny. Innym istotnym kierunkiem badań jest opracowanie jak najlepszych algorytmów dokładnych i heurystycznych dla modeli

problemów, które powstałyby przez rozszerzenie klasycznego modelu problemu rozdziału zasobów z kryterium NPV o dodatkowe kategorie zasobów (np. częściowo odnawialne, podzielne w sposób ciągły, zasoby o parametrach zmiennych w czasie) lub inne parametry opisane w punkcie drugim. Również bardzo istotnym kierunkiem dalszych badań są różne modele płatności i kontraktów zawieranych pomiędzy klientem a wykonawcą. Spojrzenie na problem od strony wykonawcy lub od strony klienta może prowadzić do zupełnie innych wniosków, a zatem do różnych modeli oraz metod rozwiązania.

LITERATURA

1. Baroum S.M., Patterson J.H.: The development of cash flow weight procedures for maximizing the net present value of a project. Journal of Operations Management, 14, 1996, 209-227.
2. Baroum S.M., Patterson J.H.: An Exact solution procedure for maximizing the net present value of cash flows in a network. w: Project scheduling: Recent models, algorithms and applications. (Węglarz J. - red.), Kluwer, 1999, 107-134.
3. Bartusch M., Möhring R., Radermacher F.J.: Scheduling project networks with resource constraints and time windows. Annals of Operations Research.
4. Bianco L., Dell'Olmo P., Speranza M.G.: Heuristics for multimode scheduling problems with dedicated resources. EJOR, 107, 1998, 260-271.
5. Błażewicz J., Cellary W., Słowiński J., Węglarz J.: Scheduling under resource constraints – deterministic models. Baltzer, Basel, 1986.
6. Böttcher J., Drexl A., Kolisch R., Salewski F.: Project scheduling under partially renewable resource constraints. Management Science, 45, 1999, 543-559.
7. Brucker P., Drexl A., Möhring R., Neumann K., Pesch E.: Resource-constrained project scheduling: Notation, classification, models and methods. EJOR, 112, 1999, 3-41.
8. Dayanand N., Padman R.: On modeling payments in projects. Journal of the Operational Research Society, 48, 1997, 906-918.
9. Demeulemeester E.L., Herroelen W.S.: A branch-and-bound procedure for the generalized resource-constrained project scheduling problem. Operations Research, 45, 1997, 201-212.
10. Doersch R.H., Patterson J.H.: Scheduling a project to maximize its net present value: A zero-one programming approach. Management Science, 23, 1977, 882-889.
11. Elmaghraby S.E.: Activity nets: A guided tour through some recent developments. EJOR, 64, 1995, 199-215.
12. Elmaghraby S.E., Herroelen W.S.: The scheduling of activities to maximize the net present value of projects, European Journal of Operational Research, 49, 1990, 35-49.
13. Etgar R., Shtub A., LeBlanc L.J.: Scheduling projects to maximize net present value -the case of time-dependent, contingent cash flows. EJOR, 96, 1997, 90-96.

14. Erengüç S.S., Tufekci S., Zappe C.: The solution of the time/cost tradeoff problem with discounted cash flows using generalized Benders decomposition. Naval Research Logistics, 40, 1993, 25-50.

15. Grinold R.C.: The payment scheduling problem. Naval Research Logistics, 19, 1972, 123-136.

16. Herroelen W.S., Gallens E.: Computational experience with an optimal procedure for the scheduling of activities to maximize the net present value of projects. EJOR, 65, 1993, 274-277.

17. Herroelen W.S., Van Dommelen P., Demeulemeester E.L.: Project network models with discounted cash flows a guided tour through recent developments. EJOR, 100, 1997, 97-121.

18. Herroelen W.S., Van Dommelen P., Demeulemeester E.L.: Resource-constrained project scheduling: A survey on recent developments. Computers and Operations Research, 25, 1998, 279-302.

19. Icmeli O., Erengüç S.S.: A tabu search adaptation to resource constrained project scheduling problem with discounted cash flows. Computers and Operations Research, 21, 1994, 841-854.

20. Icmeli O., Erengüç S.S.: A branch and bound procedure for the resource constrained project scheduling problem with discounted cash flows. Management Science, 42, 1996, 1395-1408.

21. Icmeli O., Erengüç S.S.: The resource constrained time/cost tradeoff project scheduling problem with discounted cash flows. Journal of Operations Management, 14, 1996, 255-275.

22. Icmeli O., Erengüç S.S., Zappe C.J.: Project scheduling problems: A survey. International Journal of Operations & Production Management, 13, 1993, 80-91.

23. Kazaz B., Sepil C.: Project scheduling with discounted cash flows and progress payments. Journal of the Operational Research Society, 42, 1996, 1262-1272.

24. Kimms A.: Mathematical Programming and Financial Objectives for Scheduling Projects. Kluwer Academic Publishers, 2001.

25. Kolisch R., Padman R.: An integrated survey of deterministic project scheduling. Omega – The International Journal of Management Science, 29, 2001, 249-272

26. Kolisch R., Sprecher A.: PSPLIB – A project scheduling problem library. European Journal of Operational Reasearch, 96, 1997, 205-216.

27. Neumann K., Zimmermann J.: Procedures for resource leveling and net present value problems in project scheduling with general temporal and resource constraints. EJOR, 127, 2000, 425-443.

28. Özdamar L., Dündar H.: A flexible heuristic for a multi-mode capital constrained project scheduling problem with probabilistic cash inflows. Computers & Operations Research, 24, 1997, 1187-1200.

29. Özdamar L., Ulusoy G.: A survey on the resource-constrained project scheduling problem. IIE Transactions, 27, 1995, 574-586.

30. Padman R., Smith-Daniels D.E.: Early-tardy cost trade-offs in resource constrained projects with cash flows: An optimization-guided heuristic approach. EJOR, 64, 1993, 295-311.

31. Padman R., Smith-Daniels D.E., Smith-Daniels V.L.: Heuristic scheduling of resource-constrained projects with cash flows. Naval Research Logistics, 44, 1997, 365-381.

32. Patterson J.H.: A comparison of exact approaches for solving the multiple-constrained resource, project scheduling problem. Management Science, 30, 1984, 854-867.

33. Pinder J.P., Marucheck A.S.: Using discounted cash flow heuristics to improve project net present value. Journal of Operations Management, 14, 1996, 229-240.

34. De Reyck B., Herroelen W.S.: An optimal procedure for the resource-constrained project scheduling problem with discounted cash flows and generalized precedence relations. Computers and Operations Research, 25, 1998, 1-17.

35. Russell A.H.: Cash flows in networks. Management Science, 16, 1970, 357-373.

36. Russell R.A.: A comparison of heuristics for scheduling projects with cash flows and resource restrictions. Management Science, 32, 1986, 1291-1300.

37. Salewski F., Schrimer A., Drxl A.: Project scheduling under resource and mode identity constraints: Model, complexity, methods, and applications. EJOR, 102, 1997, 88-110.

38. Schwindt Ch., Zimmermann J.: A steepest ascent approach to maximizing the net present value of projects. Mathematical Methods of Operations Research, 53, 2001, 435-450.

39. Sepil C.: Comment on Elmaghraby's and Herroelen's The scheduling of activities to maximize the net present value of projects. EJOR, 73, 1994, 185-187.

40. Sepil C., Ortaç N.: Performance of the heuristic procedures for constrained projects with progress payments. Journal of the Operational Research Society, 48, 1997, 1123-1130.

41. Shtub A., Etgar R.: A branch and bound algorithm for scheduling projects to maximize net present value: the case of time dependent, contingent cash flows. International Journal of Production Research, 35, 1997, 3367-3378.

42. Smith-Daniels D.E., Aquilano N.J.: Using a late-start resource-constrained project schedule to improve project net present value. Decision Sciences, 18, 1987, 617-630.

43. Smith-Daniels D.E., Padman R., Smith-Daniels V.L.: Heuristic scheduling of capital constrained projects. Journal of Operations Management, 14, 1996, 241-254.

44. Smith-Daniels D.E., Smith-Daniels V.L.: Maximizing the net present value of a project subject to materials and capital constraints. Journal of Operations Management, 7, 1987, 33-45.

45. Sprecher A.: Resource-constrained project scheduling: Exact methods for the multi-mode case. Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems. Springer, Berlin 1996.

46. Sung C.S., Lim S.K.: A project activity scheduling problem with net present value measure. International Journal of Production Economics, 37, 1995, 177-187.

47. Ulusoy G., Cebelli S.: An equitable approach to the payment scheduling problem in project management. EJOR, 127, 2000, 262-278.

48. Ulusoy G., Sivrikaya-Şerifoğlu F., Şahin S.: Four payment models for the multi-mode resource constrained project scheduling problem with discounted cash flows. Annals of Operations Research, 102, 2001, 237-261.

49. Vanhoucke M., Demeulemeester E.L., Herroelen W.S.: Maximizing the net present value of a project with linear time-dependent cash flows. International Journal of Production Research, 39, 2001, 3159-3181.

50. Vanhoucke M., Demeulemeester E.L., Herroelen W.S.: On maximizing the net present value of a project under renewable resource constraints. Management Science, 47, 2001, 1113-1121.

51. Węglarz J.: Project scheduling with continuously divisible doubly-constrained resources. Management Science, 27, 1981, 1040-1053.

52. Yang K.K., Talbot F.B., Patterson J.H.: Scheduling a project to maximize its present value: An integer programming approach. EJOR, 64, 1993, 188-198.

53. Yang K.K., Tay L.C., Sum C.C.: A comparison of stochastic scheduling rules for maximizing project net present value. EJOR, 85, 1995, 327-339.

54. Zhu D., Padman R.: A metaheuristic scheduling procedure for resource-constrained projects with cash flows. Naval Research Logistics, 46, 1999, 912-927.

Recenzent: Dr hab. inż. Eugeniusz Nowicki

Abstract

This paper is a survey on deterministic project scheduling problems with the maximization of the net present value (NPV) criterion. In recent years many works have been devoted to the considered class of project scheduling problem. Most of them differ among themselves in some aspects of assumed models and algorithms used to solve them. An overview of these models and algorithms for both project scheduling problem versions: with and without resource constraints is presented. The future research directions are discussed.