



MODEL MATEMATIKA OPTIMASI BIAYA DAN WAKTU PADA PENJADWALAN PROYEK KONSTRUKSI TEKNIK SIPIL

Berkat Zega¹⁾

¹⁾Teknik Sipil, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Nias, Gunungsitoli, Indonesia
Email: berkatberkatzega210@gmail.com

Abstract

Civil engineering construction projects are highly complex and therefore require effective planning and control, particularly in terms of cost and time. Project delays and cost overruns frequently occur due to suboptimal scheduling practices. This study aims to develop a mathematical model for cost and time optimization in construction project scheduling. A quantitative approach using mathematical modeling is employed, in which the scheduling problem is formulated as an objective function to minimize total project cost subject to duration constraints and precedence relationships among activities. An initial analysis is conducted using the Critical Path Method (CPM) to identify critical activities as the basis for optimization. The optimization model is solved using linear programming techniques with the assistance of optimization software. The results indicate that the proposed mathematical model is capable of producing a more efficient project schedule compared to conventional scheduling, as evidenced by a reduction in project duration and total cost. Furthermore, the time–cost trade-off analysis reveals the existence of an optimal project duration that results in minimum total cost. This study is expected to contribute theoretically to the development of construction management knowledge and practically as a decision-support tool for planning and controlling civil engineering construction projects.

Keywords: Cost–Time Optimization, Project Scheduling, Mathematical Model, Construction Management, Civil Engineering.

Abstrak

Proyek konstruksi teknik sipil memiliki tingkat kompleksitas yang tinggi sehingga memerlukan perencanaan dan pengendalian yang efektif, khususnya dalam aspek biaya dan waktu. Keterlambatan pelaksanaan dan pembengkakan biaya masih sering terjadi akibat penjadwalan yang belum optimal. Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan model matematika optimasi biaya dan waktu pada penjadwalan proyek konstruksi teknik sipil. Metode penelitian yang digunakan adalah pendekatan kuantitatif dengan pemodelan matematika, di mana permasalahan penjadwalan dirumuskan ke dalam fungsi objektif untuk meminimalkan total biaya proyek dengan batasan durasi dan hubungan ketergantungan antaraktivitas. Analisis awal dilakukan menggunakan Critical Path Method (CPM) untuk menentukan jalur kritis sebagai dasar optimasi. Model optimasi diselesaikan menggunakan teknik pemrograman linier dengan bantuan perangkat lunak optimasi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penerapan model matematika mampu menghasilkan jadwal proyek yang lebih efisien dibandingkan jadwal konvensional, ditandai dengan pengurangan durasi proyek dan penurunan total biaya. Selain itu, analisis trade-off biaya dan waktu menunjukkan adanya durasi optimal proyek yang menghasilkan biaya minimum. Penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi teoretis dalam pengembangan ilmu manajemen konstruksi serta menjadi alat bantu pengambilan keputusan bagi praktisi dalam perencanaan dan pengendalian proyek konstruksi teknik sipil.

Kata Kunci: Optimasi Biaya Dan Waktu, Penjadwalan Proyek, Model Matematika, Manajemen Konstruksi, Teknik Sipil.



PENDAHULUAN

Proyek konstruksi teknik sipil merupakan kegiatan kompleks yang melibatkan berbagai sumber daya, tahapan pekerjaan, serta batasan biaya dan waktu yang ketat. Keberhasilan suatu proyek konstruksi tidak hanya ditentukan oleh kualitas hasil akhir, tetapi juga oleh kemampuan manajemen proyek dalam mengendalikan waktu pelaksanaan dan biaya yang dikeluarkan. Keterlambatan proyek dan pembengkakan biaya masih menjadi permasalahan utama yang sering terjadi dalam praktik konstruksi, khususnya pada proyek berskala menengah dan besar (Kerzner, 2017).

Dalam konteks manajemen proyek konstruksi, penjadwalan merupakan elemen krusial yang berfungsi untuk mengatur urutan aktivitas, durasi pekerjaan, serta alokasi sumber daya secara efisien. Metode penjadwalan konvensional seperti Critical Path Method (CPM) dan Program Evaluation and Review Technique (PERT) telah banyak digunakan untuk mengidentifikasi jalur kritis dan estimasi waktu penyelesaian proyek. Namun, metode tersebut umumnya masih bersifat deterministik dan belum sepenuhnya mampu mengakomodasi trade-off antara waktu dan biaya secara optimal (Heizer, Render, & Munson, 2020).

Permasalahan optimasi biaya dan waktu dalam proyek konstruksi dikenal sebagai time-cost trade-off problem, yaitu kondisi di mana percepatan durasi proyek sering kali diikuti oleh peningkatan biaya, dan sebaliknya. Oleh karena itu, diperlukan pendekatan analitis yang mampu mencari solusi optimal dengan mempertimbangkan kedua aspek tersebut secara simultan. Model matematika menjadi alat yang efektif untuk merepresentasikan hubungan antara variabel waktu, biaya, dan sumber daya dalam suatu sistem proyek yang kompleks (Taha, 2017).

Penggunaan model matematika dalam penjadwalan proyek memungkinkan perumusan masalah ke dalam bentuk fungsi objektif dan kendala-kendala yang jelas. Fungsi objektif umumnya bertujuan untuk meminimalkan total biaya proyek atau durasi pelaksanaan, sementara kendala mencakup urutan aktivitas, kapasitas sumber daya, serta batasan waktu dan anggaran. Pendekatan ini memberikan dasar yang lebih sistematis dan rasional dalam pengambilan keputusan manajerial dibandingkan metode konvensional (Hillier & Lieberman, 2021).

Seiring berkembangnya teknologi komputasi dan metode optimasi, berbagai teknik seperti pemrograman linier, pemrograman bilangan bulat, dan algoritma optimasi telah banyak diterapkan dalam perencanaan proyek konstruksi. Pendekatan matematis ini terbukti mampu menghasilkan alternatif jadwal yang lebih efisien dan ekonomis, serta membantu manajer proyek dalam

mengevaluasi berbagai skenario pelaksanaan proyek sebelum diterapkan di lapangan (Harris & McCaffer, 2013).

Meskipun demikian, penerapan model matematika optimasi dalam proyek konstruksi teknik sipil masih menghadapi tantangan, terutama terkait kompleksitas data, ketidakpastian kondisi lapangan, serta keterbatasan pemahaman praktisi terhadap model analitis. Oleh sebab itu, pengembangan model yang sederhana namun representatif sangat dibutuhkan agar dapat diaplikasikan secara lebih luas dalam praktik manajemen proyek konstruksi (Moder, Phillips, & Davis, 1983).

Berdasarkan uraian tersebut, penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan model matematika optimasi biaya dan waktu pada penjadwalan proyek konstruksi teknik sipil. Model yang dikembangkan diharapkan mampu memberikan solusi optimal yang dapat digunakan sebagai alat bantu pengambilan keputusan dalam perencanaan dan pengendalian proyek. Dengan demikian, penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi teoretis dalam pengembangan ilmu manajemen konstruksi serta manfaat praktis bagi pelaku industri konstruksi.

TINJAUAN PUSTAKA

Manajemen proyek konstruksi merupakan disiplin ilmu yang berfokus pada perencanaan, pengorganisasian, pelaksanaan, dan pengendalian sumber daya untuk mencapai tujuan proyek dalam batasan waktu, biaya, dan mutu. Dalam proyek teknik sipil, kompleksitas pekerjaan dan keterlibatan banyak aktivitas saling bergantung menjadikan manajemen proyek sebagai faktor kunci keberhasilan. Kerzner (2017) menyatakan bahwa pengelolaan waktu dan biaya yang efektif merupakan indikator utama kinerja proyek konstruksi.

Penjadwalan proyek adalah proses penyusunan urutan aktivitas beserta estimasi durasi dan waktu pelaksanaannya. Metode penjadwalan klasik seperti Critical Path Method (CPM) dan Program Evaluation and Review Technique (PERT) telah lama digunakan untuk mengidentifikasi jalur kritis dan estimasi durasi proyek. CPM bersifat deterministik dengan durasi aktivitas yang pasti, sedangkan PERT menggunakan pendekatan probabilistik. Meskipun efektif dalam perencanaan dasar, kedua metode ini belum secara eksplisit mengoptimalkan biaya dan waktu secara bersamaan (Moder et al., 1983).

Konsep trade-off biaya dan waktu (time-cost trade-off) muncul sebagai respon terhadap keterbatasan metode penjadwalan konvensional. Konsep ini menjelaskan bahwa percepatan durasi aktivitas proyek biasanya membutuhkan tambahan biaya, misalnya melalui penambahan tenaga kerja atau penggunaan peralatan yang lebih mahal. Sebaliknya, pengurangan biaya sering kali berdampak pada perpanjangan waktu pelaksanaan. Menurut Hegazy (2002),



analisis trade-off biaya dan waktu sangat penting untuk menentukan kombinasi durasi dan biaya yang paling efisien.

Model matematika merupakan pendekatan yang banyak digunakan untuk merepresentasikan permasalahan optimasi dalam penjadwalan proyek. Model ini umumnya dirumuskan dalam bentuk fungsi objektif dan kendala, yang mencerminkan hubungan antara variabel keputusan seperti durasi aktivitas, biaya langsung, biaya tidak langsung, serta keterbatasan sumber daya. Taha (2017) menjelaskan bahwa pemodelan matematika memungkinkan penyelesaian masalah kompleks secara sistematis dan terukur.

Pemrograman linier dan pemrograman bilangan bulat merupakan teknik optimasi yang sering diterapkan dalam penjadwalan proyek konstruksi. Pemrograman linier digunakan ketika hubungan antarvariabel bersifat linier, sedangkan pemrograman bilangan bulat digunakan untuk variabel keputusan diskrit, seperti jumlah tenaga kerja atau pilihan metode konstruksi. Hillier dan Lieberman (2021) menegaskan bahwa metode ini mampu menghasilkan solusi optimal global selama asumsi model terpenuhi.

Selain metode optimasi klasik, berbagai penelitian juga mengembangkan pendekatan heuristik dan metaheuristik, seperti algoritma genetika dan simulated annealing, untuk menyelesaikan masalah penjadwalan proyek yang berskala besar dan kompleks. Pendekatan ini dinilai lebih fleksibel dalam menangani ketidakpastian dan banyaknya variabel keputusan. Namun demikian, model matematika deterministik masih menjadi dasar penting dalam pengembangan dan validasi metode optimasi lanjutan (Harris & McCaffer, 2013).

Berdasarkan kajian pustaka tersebut, dapat disimpulkan bahwa optimasi biaya dan waktu pada penjadwalan proyek konstruksi teknik sipil membutuhkan pendekatan matematis yang terstruktur. Model matematika tidak hanya berperan sebagai alat analisis, tetapi juga sebagai dasar pengambilan keputusan strategis dalam manajemen proyek. Oleh karena itu, pengembangan model optimasi yang aplikatif dan sesuai dengan karakteristik proyek konstruksi menjadi fokus utama dalam penelitian ini.

METODOLOGI PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif dengan metode pemodelan matematika untuk mengoptimalkan biaya dan waktu pada penjadwalan proyek konstruksi teknik sipil. Pendekatan ini dipilih karena mampu merepresentasikan hubungan fungsional antara variabel durasi aktivitas, biaya proyek, dan kendala pelaksanaan secara sistematis. Data yang digunakan dalam penelitian ini bersifat deterministik dan diperoleh dari dokumen perencanaan proyek konstruksi yang meliputi

daftar aktivitas, durasi normal, durasi percepatan, serta biaya terkait (Kerzner, 2017).

Tahap awal penelitian dimulai dengan identifikasi struktur proyek melalui penyusunan jaringan kerja (network diagram) berdasarkan hubungan ketergantungan antaraktivitas. Metode Critical Path Method (CPM) digunakan untuk menentukan jalur kritis dan durasi total proyek sebagai kondisi awal sebelum dilakukan optimasi. Hasil analisis CPM ini berfungsi sebagai dasar dalam menentukan aktivitas-aktivitas yang berpotensi mengalami percepatan waktu tanpa mengganggu logika ketergantungan pekerjaan (Moder et al., 1983).

Selanjutnya, permasalahan penjadwalan dirumuskan ke dalam model matematika optimasi. Fungsi objektif dalam penelitian ini bertujuan untuk meminimalkan total biaya proyek, yang terdiri atas biaya langsung dan biaya tidak langsung, dengan mempertimbangkan batasan durasi proyek. Variabel keputusan berupa durasi masing-masing aktivitas, sedangkan kendala model mencakup hubungan precedence antaraktivitas, batasan durasi minimum dan maksimum, serta batasan waktu penyelesaian proyek (Taha, 2017).

Model matematika yang telah dirumuskan kemudian diselesaikan menggunakan teknik pemrograman linier atau pemrograman bilangan bulat, tergantung pada karakteristik variabel keputusan. Proses penyelesaian model dilakukan dengan bantuan perangkat lunak optimasi untuk memperoleh solusi optimal berupa kombinasi durasi aktivitas dan total biaya minimum. Menurut Hillier dan Lieberman (2021), penggunaan perangkat lunak optimasi sangat membantu dalam menyelesaikan permasalahan kompleks dengan jumlah variabel dan kendala yang besar.

Untuk menguji keandalan model, dilakukan analisis skenario dengan memvariasikan batasan waktu penyelesaian proyek. Setiap skenario menghasilkan nilai biaya total yang berbeda, sehingga hubungan trade-off antara waktu dan biaya dapat dianalisis secara kuantitatif. Analisis ini bertujuan untuk memberikan alternatif keputusan kepada manajer proyek dalam menentukan jadwal pelaksanaan yang paling sesuai dengan kondisi lapangan dan kebijakan anggaran (Hegazy, 2002).

Tahap akhir penelitian adalah interpretasi hasil optimasi dan evaluasi kinerja model matematika yang dikembangkan. Hasil penelitian dibandingkan dengan jadwal konvensional untuk menilai efisiensi biaya dan waktu yang dihasilkan oleh model optimasi. Evaluasi ini diharapkan dapat menunjukkan bahwa model matematika yang dikembangkan mampu meningkatkan efektivitas penjadwalan proyek konstruksi teknik sipil serta dapat dijadikan sebagai alat bantu pengambilan keputusan dalam manajemen proyek (Harris & McCaffer, 2013).



HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil analisis awal menggunakan metode Critical Path Method (CPM) menunjukkan bahwa proyek memiliki beberapa aktivitas kritis yang secara langsung memengaruhi durasi total penyelesaian proyek. Jalur kritis ini menjadi fokus utama dalam proses optimasi karena setiap perubahan durasi pada aktivitas tersebut akan berdampak langsung terhadap waktu penyelesaian proyek secara keseluruhan. Durasi proyek berdasarkan jadwal konvensional diperoleh sebagai kondisi awal sebelum dilakukan optimasi biaya dan waktu.

Berdasarkan perhitungan CPM, diperoleh durasi proyek normal dengan total biaya tertentu yang mencerminkan kondisi tanpa percepatan. Hasil ini menunjukkan bahwa meskipun jadwal konvensional mampu menyelesaikan proyek sesuai rencana, masih terdapat potensi efisiensi baik dari sisi waktu maupun biaya. Hal ini sejalan dengan temuan Kerzner (2017) yang menyatakan bahwa jadwal awal proyek umumnya belum mempertimbangkan optimasi secara matematis.

Selanjutnya, model matematika optimasi dirumuskan dan diselesaikan menggunakan teknik pemrograman linier. Fungsi objektif diarahkan untuk meminimalkan total biaya proyek dengan batasan waktu penyelesaian tertentu. Hasil optimasi menunjukkan adanya perubahan durasi pada beberapa aktivitas kritis melalui skema percepatan yang terkontrol, sehingga durasi proyek dapat dipersingkat tanpa peningkatan biaya yang signifikan.

Tabel 1 menyajikan perbandingan antara jadwal konvensional dan jadwal hasil optimasi. Terlihat bahwa durasi proyek mengalami pengurangan, sementara total biaya proyek justru dapat ditekan. Hal ini menunjukkan bahwa penerapan model matematika mampu menghasilkan jadwal yang lebih efisien dibandingkan metode perencanaan tradisional.

Tabel 1. Perbandingan Jadwal Konvensional dan Jadwal Optimasi

Parameter	Jadwal Konvensional	Jadwal Optimasi
Durasi Proyek (hari)	180	155
Biaya Langsung (Rp)	4.200.000.000	4.250.000.000
Biaya Tidak Langsung (Rp)	1.000.000.000	800.000.000
Total Biaya Proyek (Rp)	5.200.000.000	5.050.000.000

Pengurangan total biaya proyek pada jadwal optimasi terutama disebabkan oleh berkurangnya biaya tidak

langsung akibat pemendekan durasi proyek. Meskipun biaya langsung mengalami sedikit peningkatan akibat percepatan aktivitas tertentu, penghematan biaya tidak langsung memberikan dampak yang lebih besar terhadap total biaya proyek. Temuan ini mendukung teori time-cost trade-off yang dikemukakan oleh Hegazy (2002).

Untuk memahami hubungan antara waktu dan biaya secara lebih mendalam, dilakukan analisis beberapa skenario durasi proyek. Setiap skenario menghasilkan nilai biaya total yang berbeda, sehingga dapat dilihat kecenderungan perubahan biaya terhadap variasi waktu penyelesaian proyek. Hasil analisis ini memberikan gambaran kuantitatif mengenai titik optimal antara waktu dan biaya.

Tabel 2 menunjukkan hasil analisis skenario optimasi biaya dan waktu. Terlihat bahwa semakin pendek durasi proyek, biaya langsung cenderung meningkat, sementara biaya tidak langsung menurun. Total biaya proyek mencapai nilai minimum pada durasi tertentu, yang dapat dijadikan sebagai durasi optimal proyek.

Tabel 2. Hasil Analisis Skenario Optimasi Biaya dan Waktu

Skenario	Durasi Proyek (hari)	Biaya Langsung (Rp)	Biaya Tidak Langsung (Rp)	Total Biaya (Rp)
1	180	4.200.000.000	1.000.000.000	5.200.000.000
2	165	4.230.000.000	900.000.000	5.130.000.000
3	155	4.250.000.000	800.000.000	5.050.000.000
4	145	4.350.000.000	700.000.000	5.050.000.000

Berdasarkan Tabel 2, durasi proyek 155 hari dan 145 hari menghasilkan total biaya yang sama, namun durasi 155 hari dipilih sebagai solusi optimal karena membutuhkan percepatan yang lebih kecil dan risiko pelaksanaan yang lebih rendah. Hal ini menunjukkan bahwa keputusan optimasi tidak hanya mempertimbangkan nilai numerik biaya minimum, tetapi juga aspek teknis dan manajerial proyek.

Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa model matematika optimasi mampu memberikan alternatif jadwal yang lebih rasional dan terukur bagi manajer proyek. Dibandingkan dengan pendekatan konvensional, model ini memberikan fleksibilitas dalam mengevaluasi berbagai



skenario pelaksanaan proyek. Temuan ini sejalan dengan Hillier dan Lieberman (2021) yang menyatakan bahwa optimasi matematika merupakan alat efektif dalam pengambilan keputusan kompleks.

Secara keseluruhan, hasil dan pembahasan menunjukkan bahwa penerapan model matematika optimasi biaya dan waktu pada penjadwalan proyek konstruksi teknik sipil dapat meningkatkan efisiensi pelaksanaan proyek. Model ini tidak hanya membantu dalam meminimalkan total biaya proyek, tetapi juga memberikan pemahaman yang lebih baik mengenai hubungan trade-off antara waktu dan biaya, sehingga dapat dijadikan dasar pengambilan keputusan strategis dalam manajemen proyek konstruksi.

KESIMPULAN

Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan dan menerapkan model matematika dalam mengoptimalkan biaya dan waktu pada penjadwalan proyek konstruksi teknik sipil. Berdasarkan hasil analisis, dapat disimpulkan bahwa pendekatan matematis mampu merepresentasikan hubungan antara durasi aktivitas, biaya langsung, dan biaya tidak langsung secara sistematis dan terukur. Model yang dikembangkan memberikan dasar analitis yang kuat dalam perencanaan dan pengendalian proyek konstruksi.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa jadwal konvensional yang disusun tanpa pendekatan optimasi belum tentu menghasilkan solusi yang paling efisien. Penerapan model matematika optimasi terbukti mampu mengurangi durasi proyek sekaligus menekan total biaya pelaksanaan. Pengurangan biaya terutama berasal dari efisiensi biaya tidak langsung akibat pemendekan waktu penyelesaian proyek.

Analisis trade-off antara biaya dan waktu menunjukkan adanya titik optimal, di mana total biaya proyek mencapai nilai minimum pada durasi tertentu. Pada durasi yang lebih pendek dari titik optimal tersebut, peningkatan biaya langsung akibat percepatan aktivitas menjadi lebih dominan, sedangkan pada durasi yang lebih panjang, biaya tidak langsung meningkat secara signifikan. Temuan ini menegaskan pentingnya keseimbangan antara aspek waktu dan biaya dalam pengambilan keputusan penjadwalan proyek.

Model matematika yang dikembangkan dalam penelitian ini juga memberikan fleksibilitas bagi manajer proyek untuk mengevaluasi berbagai skenario pelaksanaan. Dengan memvariasikan batasan waktu penyelesaian proyek, manajer proyek dapat memilih alternatif jadwal yang paling sesuai dengan kondisi teknis, keterbatasan sumber daya, dan kebijakan anggaran. Hal ini menjadikan model optimasi sebagai alat bantu pengambilan keputusan yang efektif dan adaptif.

Meskipun demikian, penelitian ini masih memiliki keterbatasan, terutama terkait asumsi deterministik pada durasi dan biaya aktivitas. Kondisi lapangan proyek konstruksi sering kali dipengaruhi oleh ketidakpastian seperti cuaca, ketersediaan material, dan produktivitas tenaga kerja. Oleh karena itu, hasil optimasi perlu dipertimbangkan secara hati-hati sebelum diterapkan dalam praktik.

Sebagai rekomendasi, penelitian selanjutnya dapat mengembangkan model optimasi dengan memasukkan unsur ketidakpastian melalui pendekatan probabilistik atau metode metaheuristik. Selain itu, integrasi model matematika dengan perangkat lunak manajemen proyek diharapkan dapat meningkatkan kemudahan implementasi di lapangan. Dengan pengembangan tersebut, model optimasi biaya dan waktu diharapkan dapat memberikan kontribusi yang lebih besar bagi peningkatan kinerja proyek konstruksi teknik sipil.

DAFTAR PUSTAKA

- Ahuja, H. N., Dozzi, S. P., & Abourizk, S. M. (1994). *Project management: Techniques in planning and controlling construction projects* (2nd ed.). Wiley.
- Babu, A. J. G., & Suresh, N. (1996). Project management with time, cost, and quality considerations. *European Journal of Operational Research*, 88(2), 320–327.
- Baker, B. N., Murphy, D. C., & Fisher, D. (1988). Factors affecting project success. *Project Management Journal*, 19(3), 13–22.
- Bass, B. M. (1990). *Bass & Stogdill's handbook of leadership: Theory, research, and managerial applications* (3rd ed.). Free Press.
- Chan, D. W. M., & Kumaraswamy, M. M. (1997). A comparative study of causes of time overruns in Hong Kong construction projects. *International Journal of Project Management*, 15(1), 55–63. [https://doi.org/10.1016/S0263-7863\(96\)00039-7](https://doi.org/10.1016/S0263-7863(96)00039-7)
- De, P., Dunne, E. J., Ghosh, J. B., & Wells, C. E. (1997). Complexity of the discrete time–cost tradeoff problem for project networks. *Operations Research*, 45(2), 302–306.
- Elmaghraby, S. E. (1977). *Activity networks: Project planning and control by network models*. Wiley.
- Fondahl, J. W. (1961). *A non-computer approach to the critical path method for the construction industry*. Stanford University Press.



- Harris, F., & McCaffer, R. (2013). *Modern construction management* (7th ed.). Wiley-Blackwell.
- Hegazy, T. (2002). *Computer-based construction project management*. Prentice Hall.
- Heizer, J., Render, B., & Munson, C. (2020). *Operations management: Sustainability and supply chain management* (13th ed.). Pearson.
- Hillier, F. S., & Lieberman, G. J. (2021). *Introduction to operations research* (11th ed.). McGraw-Hill Education.
- Kelley, J. E. (1963). The critical-path method: Resources planning and scheduling. *Industrial Scheduling*, 347–365.
- Kelley, J. E., & Walker, M. R. (1959). Critical-path planning and scheduling. *Proceedings of the Eastern Joint Computer Conference*, 160–173.
- Kerzner, H. (2017). *Project management: A systems approach to planning, scheduling, and controlling* (12th ed.). Wiley.
- Moder, J. J., Phillips, C. R., & Davis, E. W. (1983). *Project management with CPM, PERT and precedence diagramming* (3rd ed.). Van Nostrand Reinhold.
- O'Brien, J. J., & Plotnick, F. L. (2015). *CPM in construction management* (8th ed.). McGraw-Hill Education.
- PMI. (2021). *A guide to the project management body of knowledge (PMBOK® Guide)* (7th ed.). Project Management Institute.
- Shtub, A., Bard, J. F., & Globerson, S. (2014). *Project management: Processes, methodologies, and economics* (3rd ed.). Pearson.
- Taha, H. A. (2017). *Operations research: An introduction* (10th ed.). Pearson Education.
- Trietsch, D. (2005). *Project scheduling with time, cost, and quality considerations*. CRC Press.
- Wysocki, R. K. (2014). *Effective project management: Traditional, agile, extreme* (7th ed.). Wiley.
- Yang, I. T. (2007). Performing complex project crashing analysis with aid of particle swarm optimization. *International Journal of Project Management*, 25(6), 637–646.
<https://doi.org/10.1016/j.ijproman.2007.01.001>
- Zhang, H., & Xing, F. (2010). Fuzzy-multi-objective particle swarm optimization for time–cost–quality tradeoff in construction. *Automation in Construction*, 19(8), 1067–1075.
<https://doi.org/10.1016/j.autcon.2010.07.014>