



Economic and Environmental Assessment and Prioritization of Wood-Farming Options Using Treated Wastewater (Case Study: Mahdasht, Karaj)

Mahdi Malekpour¹ | Bizan Nazari² | Abdolmajid Liaghat³ | Hamze Ali Alizadeh⁴ |

Mojtaba Mohammadi Zadeh⁵

1. Department of Irrigation and Reclamation Engineering, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran. Email: mahdi.malekpour@ut.ac.ir
2. Corresponding Author, Department of Irrigation and Reclamation Engineering, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran. E-mail: binazari@ut.ac.ir
3. Department of Irrigation and Reclamation Engineering, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran. E-mail: aliaghat@ut.ac.ir
4. Department of Water Engineering, College of Agriculture and Natural Resources, University of Ilam, Ilam, Iran. E-mail: h.alizadeh@ilam.ac.ir
5. Department of Engineering and Studies, General Department of Natural Resources and Watershed Management, Alborz, Iran. E-mail: Mohammadizadehm81@gmail.com

Article Info

Article type: Research Article

Article history:

Received: May. 12, 2026

Revised: June. 7 2026

Accepted: June. 28, 2026

Published online: Sep. 2026

Keywords:

**Net Present Value (NPV),
Internal Rate of Return (IRR),
Benefit Cost Ratio (BCR).**

ABSTRACT

The restrictive policies regarding timber harvesting from natural forests, compounded by critical water scarcity, have necessitated the exploration of sustainable alternatives for industrial wood production. This study investigates the feasibility of using treated wastewater for irrigation in commercial-scale plantations (2 ha) in Mahdasht, Karaj, Iran. The economic and environmental performance of three fast-growing species—*Populus* spp., *Eucalyptus* spp., and *Paulownia* spp.—was evaluated. Economic viability was determined using Net Present Value (NPV), Internal Rate of Return (IRR), and Benefit–Cost Ratio (BCR), alongside sensitivity analyses. Our findings indicate significant inter-species variations in financial performance. *Paulownia* demonstrated the highest economic potential (NPV: 2.48 billion Tomans; IRR: 28.8%; BCR: 1.56), followed by *Eucalyptus* and *Populus*. Sensitivity analysis identified timber market price as the primary driver of long-term profitability; notably, *Populus* showed higher vulnerability to land-cost fluctuations, while *Eucalyptus* was sensitive to irrigation expenditures. Crucially, this study demonstrates that reliance solely on financial metrics is insufficient for species selection. While *Paulownia* offered superior returns, it entails higher ecological and management risks. *Populus*, despite lower economic gains, exhibited the highest environmental sustainability and ecological compatibility, aligning better with national conservation objectives. We conclude that a multi criteria decision-making (MCDM) framework—balancing economic profitability, environmental sustainability, and implementation feasibility—is essential for the development of resilient plantation forestry in water-limited arid and semi-arid regions.

Cite this article: Malekpour, M., Nazari, B., Liaghat, A., Alizadeh, H., & Mohammadi Zadeh, M. (2026). Economic and Environmental Assessment and Prioritization of Wood Farming Options Using Treated Wastewater (Case Study: Mahdasht, Karaj), *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 57 (7), 1683-1706. <http://doi.org/10.22059/ijswr.2026.412832.670137>

© The Author(s).

Publisher: University of Tehran Press.



DOI: <http://doi.org/10.22059/ijswr.2026.412832.670137>

EXTENDED ABSTRACT

Introduction

Following the implementation of Iran's forest harvesting restrictions and the decline in industrial timber imports, a considerable gap has emerged between domestic timber demand and supply. Fast-growing plantations irrigated with treated municipal wastewater offer a promising solution by providing sustainable raw materials while reducing pressure on natural forests. However, wastewater irrigation may also pose environmental risks such as soil salinity and degradation, requiring integrated evaluation of economic and environmental performance. Therefore, this study compared *Paulownia* spp., *Eucalyptus* spp., and *Populus* spp. cultivated under treated wastewater irrigation in Mahdasht, Karaj, using Net Present Value (NPV), Internal Rate of Return (IRR), Benefit–Cost Ratio (BCR), and an Environmental Sustainability Index (ESI) to identify the most suitable species.

Materials and Methods

The study was conducted in the Mahdasht Plain (Karaj, Iran). Economic feasibility was assessed using a discounted cash flow approach with a 15% discount rate by calculating NPV, IRR, and BCR based on establishment, irrigation, maintenance, harvesting, transportation costs, and timber revenues. Wastewater quality was evaluated according to FAO and WHO guidelines. One-way sensitivity analysis was performed by varying land, wastewater, seedling costs, and timber prices by ± 10 –30%. Additional scenarios examined plantation distances of 3, 7, and 10 km from the wastewater treatment plant. Environmental sustainability was evaluated using a composite ESI based on water requirement, wastewater compatibility, soil impacts, ecological risk, and legal compliance.

Results and Discussion

Paulownia showed the highest economic performance, with the greatest NPV (2.48 billion tomans), IRR (28.8%), and BCR (1.56), followed by *Eucalyptus* and *Populus*. Sensitivity analysis identified timber selling price as the most influential factor affecting profitability, whereas *Eucalyptus* was particularly sensitive to irrigation costs and *Populus* to land costs. Increasing transportation distance reduced profitability for all species, although *Paulownia* remained economically viable even at 10 km.

Environmental assessment produced a different ranking. *Populus* achieved the highest ESI (8.4/10) because of its lower ecological risk, moderate water demand, and compliance with conservation policies. *Eucalyptus* showed moderate environmental performance (6.4/10), whereas *Paulownia* obtained the lowest score (4.4/10) despite its superior economic returns. These findings demonstrate that economic profitability does not necessarily correspond to environmental sustainability.

Discussion and Conclusion

Paulownia was identified as the most profitable species for wastewater-irrigated plantations, while *Populus* provided the highest environmental sustainability and the lowest ecological risk. *Eucalyptus* represented a balanced alternative with acceptable economic and environmental performance. Overall, species selection should be based on an integrated assessment of economic, environmental, operational, and regulatory criteria rather than financial indicators alone. Such a multi-criteria approach can support sustainable plantation development and efficient wastewater utilization in water-scarce regions.

Funding

This research received no specific grant from any funding agency in the public, commercial, or not-for-profit sectors.

Authorship contribution

All authors contributed equally to this work. All authors participated in the conception and design of the study, data acquisition, analysis and interpretation of the results, manuscript writing, and critical revision. All authors approved the final manuscript and agree to be accountable for all aspects of the work.

Declaration of Generative AI and AI-assisted technologies in the writing process

The authors confirm that no generative artificial intelligence (AI) or AI-assisted technologies were used in the preparation, writing, editing, or revision of this manuscript. The entire content of the manuscript was created exclusively by the authors, who assume full responsibility for its scientific accuracy, originality, and integrity.

Data availability statement

The datasets generated and/or analyzed during this study are available from the corresponding author upon reasonable request. Access to the data will be provided in accordance with applicable research ethics, data management policies, and institutional regulations.

Acknowledgements

The authors sincerely thank the anonymous reviewers for their thorough evaluation, constructive comments, and valuable recommendations. Their insightful feedback has made a significant contribution to improving the scientific quality, clarity, coherence, and overall presentation of this manuscript.

Ethical considerations

This study was based solely on data analysis and economic evaluation and did not involve human participants, animals, biological specimens, or any experimental intervention. Therefore, ethical approval from an institutional review board or ethics committee was not required.

Conflict of interest

The authors declare that they have no known competing financial, professional, personal, or institutional interests that could have influenced the design, conduct, analysis, interpretation, or publication of this study.

ارزیابی اقتصادی و محیط زیستی و اولویت بندی گزینه های زراعت چوب با پساب تصفیه شده (مطالعه موردی ماهدشت کرج)

مهدی ملک پور^۱ | بیژن نظری^۲ | عبدالمجید لیاقت^۳ | حمزه علی علیزاده^۴ | مجتبی محمدی زاده^۵

۱. گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکده گان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. رایانامه: mahdi.malekpour@ut.ac.ir

۲. نویسنده مسئول، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکده گان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. رایانامه:

binazari@ut.ac.ir

۳. گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکده گان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. رایانامه: aliaghat@ut.ac.ir

۴. گروه مهندسی آب، دانشکده گان علوم کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه ایلام، ایلام، ایران. رایانامه: h.alizadeh@ilam.ac.ir

۵. اداره مهندسی و مطالعات، اداره کل منابع طبیعی و آبخیزداری استان البرز، البرز، ایران. رایانامه: Mohammadizadehm81@gmail.com

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	سیاست های محدودکننده بهره برداری از جنگل های طبیعی، در کنار بحران کم آبی، لزوم جستجوی جایگزین های پایدار برای تولید چوب صنعتی را بیش از پیش نمایان کرده است. در این مطالعه، امکان سنجی استفاده از پساب تصفیه شده برای آبیاری در سطح کشت تجاری (۲ هکتار) در منطقه ماهدشت کرج مورد بررسی قرار گرفت. عملکرد اقتصادی و محیط زیستی سه گونه سریع الرشد شامل صنوبر (<i>Populus spp.</i>)، اکالیپتوس (<i>Eucalyptus spp.</i>) و پالونیا (<i>Paulownia spp.</i>) ارزیابی شد. توجیه اقتصادی طرح با استفاده از شاخص های ارزش خالص فعلی (NPV)، نرخ بازده داخلی (IRR) و نسبت منفعت به هزینه (BCR) و با انجام تحلیل حساسیت محاسبه گردید. یافته ها بیانگر تفاوت های معناداری در عملکرد مالی گونه های مورد مطالعه است. پالونیا با دستیابی به NPV برابر ۲/۴۸ میلیارد تومان، IRR برابر ۲۸/۸ درصد و BCR برابر ۱/۵۶ بالاترین پتانسیل اقتصادی را به خود اختصاص داد و پس از آن، گونه های اکالیپتوس و صنوبر در رتبه های بعدی قرار گرفتند. تحلیل حساسیت نشان داد که قیمت چوب در بازار، تعیین کننده ترین عامل در سودآوری بلندمدت است؛ به طور مشخص، صنوبر در برابر نوسانات هزینه های زمین و اکالیپتوس در برابر هزینه های آبیاری حساسیت بیشتری نشان دادند. نکته حائز اهمیت این پژوهش این است که اتکای صرف به شاخص های مالی برای انتخاب گونه جهت کشت، ناکافی است. با وجود اینکه پالونیا بازده اقتصادی بالاتری ارائه داد، اما با ریسک های اکولوژیک و مدیریتی بیشتری همراه است. در مقابل، صنوبر با وجود بازده اقتصادی کمتر، بالاترین پایداری زیست محیطی و سازگاری اکولوژیک را از خود نشان داد که با اهداف کلان حفاظت از منابع طبیعی کشور همسویی بیشتری دارد. در نهایت، این مطالعه نتیجه گیری می کند که برای توسعه جنگل کاری تاب آور در مناطق خشک و نیمه خشک، بهره گیری از یک چارچوب تصمیم گیری چندمعیاره (MCDM) که تعادلی میان سودآوری اقتصادی، پایداری محیط زیستی و قابلیت اجرایی ایجاد کند، الزامی است.
واژه های کلیدی: ارزش فعلی خالص، نرخ بازگشت سرمایه، نسبت سود به هزینه	

استناد: ملک پور، مهدی؛ نظری، بیژن؛ و لیاقت، عبدالمجید؛ علیزاده، حمزه علی؛ محمدی زاده، مجتبی (۱۴۰۵). ارزیابی اقتصادی و محیط زیستی و اولویت بندی گزینه های زراعت چوب با پساب تصفیه شده (مطالعه موردی ماهدشت کرج). مجله تحقیقات آب و خاک ایران، ۵۷ (۷)، ۱۶۸۳-۱۷۰۶.



<http://doi.org/10.22059/ijswr.2026.412832.670137>

© نویسندگان.

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

DOI: <http://doi.org/10.22059/ijswr.2026.412832.670137>

مقدمه

براساس ماده ۳۸ قانون برنامه ششم توسعه از سال ۱۳۹۶ در پی اجرای برنامه تنفس جنگل‌های هیرکانی و اعمال محدودیت‌های قانونی بر بهره‌برداری صنعتی از جنگل‌های طبیعی شمال کشور، هم‌زمان با کاهش واردات چوب ناشی از نوسانات شدید نرخ ارز و محدودیت‌های ارزی، عرضه چوب صنعتی در کشور با کاهش معناداری مواجه شد (گوشه گیر، ۱۴۰۱). تداوم این روند، منجر به شکل‌گیری شکاف ساختاری میان عرضه و تقاضای چوب صنعتی و بروز کمبود گسترده در بازار داخلی گردید (مدیر رحمتی، ۱۳۹۵). از طرفی، صنایع چوب و کاغذ در ایران، سالانه نیازمند تخمینی معادل ۱۸ میلیون متر مکعب چوب هستند (RIFR, 2020). این میزان تقاضا در شرایطی مطرح است که تنها ۳/۹ درصد از مساحت کشور را پوشش جنگلی تشکیل می‌دهد (MAJ, 2020)، وضعیتی که اتکا صرف به منابع جنگلی طبیعی را از منظر زیست‌محیطی و اقتصادی غیرممکن و ناپایدار می‌سازد. شواهد علمی اخیر، زراعت چوب را به عنوان یک راهبرد کلیدی برای تعدیل این ناترازی معرفی می‌کند. مطالعات نشان می‌دهند که توسعه این بخش، به‌ویژه با استفاده از گونه‌های با رشد سریع، می‌تواند فشار بر اکوسیستم‌های جنگلی ارزشمند را به طور قابل توجهی کاهش دهد و نقش مؤثری در تأمین پایدار مواد اولیه صنایع سلولزی ایفا کند. علاوه بر این، یافته‌ها بر اهمیت ادغام زراعت چوب در اراضی مستعد، به منظور ایجاد اشتغال پایدار روستایی و افزایش تاب‌آوری اقتصادی مناطق، تأکید دارند (دانه‌کار و محمودی، ۱۳۹۱). برآوردهای کارشناسی حاکی از آن است که توسعه زراعت چوب در سطحی حدود ۳۲۰ هزار هکتار از اراضی مناسب، پتانسیل تأمین بیش از ۸۰ درصد نیاز صنایع چوب و کاغذ کشور را دارد (RIFR, 2020). دستیابی به این هدف مستلزم اتخاذ رویکردهای مدیریتی نوین و استفاده از ابزارهای علمی مانند ارزیابی تناسب اراضی با رویکرد سیستمی است. در این چارچوب، توسعه هدفمند و برنامه‌ریزی‌شده زراعت چوب به‌عنوان یکی از محوری‌ترین راهبردهای سیاستی برای تأمین پایدار نیاز چوبی کشور، کاهش وابستگی به واردات و صیانت از جنگل‌های طبیعی، در دستور کار نهادهای متولی بخش منابع طبیعی و کشاورزی قرار گرفت. از طرفی افزایش فشار بر منابع آب متعارف، تشدید خشکسالی‌های متوالی و پیامدهای تغییر اقلیم، بهره‌گیری از منابع آب غیرمتعارف را به یکی از محورهای اساسی سیاست‌گذاری در بخش آب و کشاورزی تبدیل کرده است (García et al., 2011). در این میان، استفاده مجدد از پساب تصفیه‌شده به‌عنوان بخشی از رویکرد مدیریت یکپارچه منابع آب، در اسناد بین‌المللی به‌عنوان راهکاری مؤثر برای کاهش برداشت از منابع آب شیرین، افزایش تاب‌آوری سامانه‌های تولیدی و ارتقای پایداری محیط‌زیستی مورد تأکید قرار گرفته است (توکلی‌نکو و پورمیدانی، ۱۴۰۰). استفاده از پساب تصفیه‌شده در زراعت چوب، امکان استفاده مجدد از آب و بخشی از عناصر غذایی موجود در پساب را فراهم می‌کند و می‌تواند هزینه‌های تأمین آب را کاهش دهد. با این حال، کاربرد بلندمدت پساب ممکن است با چالش‌هایی نظیر تجمع املاح، افزایش شوری و سدیمی شدن خاک، تغییر نفوذپذیری و نیاز به پایش مستمر کیفیت آب و خاک همراه باشد. از این رو، ارزیابی هم‌زمان ابعاد اقتصادی و محیط‌زیستی استفاده از پساب در زراعت چوب ضروری است. از سوی دیگر، با تشدید کمبود منابع آب در مناطق خشک و نیمه‌خشک، تقاضا برای استفاده مجدد از پساب در بخش‌های مختلف کشاورزی رو به افزایش است و تخصیص این منبع به فعالیت‌های مختلف نیازمند ارزیابی‌های اقتصادی، محیط‌زیستی و مدیریتی است (Heyde, 2025). در این میان، زراعت چوب به دلیل تولید محصول غیرخوراکی، امکان استفاده از آب با کیفیت پایین‌تر و نقش آن در کاهش فشار بر جنگل‌های طبیعی، به‌عنوان یکی از گزینه‌های بالقوه استفاده از پساب مطرح شده است. بنابراین، بررسی اقتصادی و محیط‌زیستی این گزینه می‌تواند اطلاعات لازم را برای تصمیم‌گیری در خصوص تخصیص بهینه منابع آب نامتعارف فراهم کند (Hamidi, 2025). بر اساس دستورالعمل‌های سازمان جهانی بهداشت، استفاده از پساب تصفیه‌شده برای محصولات غیرخوراکی، از جمله زراعت چوب، در صورت رعایت معیارهای کیفی و مدیریت ریسک‌های بهداشتی، از نظر سلامت عمومی قابل قبول ارزیابی می‌شود (WHO, 2006). همچنین، سازمان خواربار و کشاورزی ملل متحد تأکید می‌کند که پساب تصفیه‌شده، در صورت کنترل شاخص‌هایی نظیر هدایت الکتریکی، نسبت جذب سدیم و غلظت عناصر بالقوه سمی، می‌تواند به‌عنوان منبعی پایدار برای آبیاری درختان چوبی مورد استفاده قرار گیرد (Ayer, 1985). زراعت چوب به‌عنوان یکی از راهبردهای کلیدی تأمین پایدار چوب صنعتی و کاهش فشار بر جنگل‌های طبیعی، به‌طور ذاتی نیازمند مصرف قابل توجه آب است؛ موضوعی که در بسیاری از مناطق خشک و نیمه‌خشک کشور به چالشی اساسی تبدیل شده است. از این رو، آبیاری درختان چوبی با پساب تصفیه‌شده به دلیل غیرخوراکی بودن محصول نهایی، دوره رشد طولانی و ظرفیت بالای جذب عناصر غذایی، از منظر فنی، اقتصادی و محیط‌زیستی گزینه‌ای مناسب تلقی می‌شود (Jiménez and Asano, 2008). پساب تصفیه‌شده، در صورت دستیابی به کیفیت مطلوب، حاوی مقادیر قابل توجهی از عناصر غذایی نظیر نیتروژن و فسفر است که می‌تواند بخشی از نیاز تغذیه‌ای درختان را تأمین نموده و هم‌زمان موجب کاهش مصرف کودهای



شیمیایی و هزینه‌های تولید شود (Toze, 2006).

در سال‌های اخیر، انجام تحلیل‌های اقتصادی در حوزه زراعت چوب و به‌ویژه گونه‌های سریع‌الرشد، به‌منظور تأمین پایدار چوب صنعتی و کاهش فشار بر جنگل‌های طبیعی، در سطح بین‌المللی و ملی گسترش یافته است. مطالعات اخیر نشان داده‌اند که تحلیل اقتصادی زراعت گونه‌های سریع‌الرشد می‌تواند مبنای تصمیم‌گیری سرمایه‌گذاران و سیاست‌گذاران فراهم کند. مطالعه‌ای با استفاده از روش جریان نقدی تنزیل‌شده، سودآوری اقتصادی پالونیا را در یک مزرعه در جنوب ایتالیا بررسی کرده است. نتایج نشان داد که حاشیه سود ناخالص سالانه پالونیا برای تولید هم‌زمان چوب الوار و تراشه چوب حدود ۳۵۷/۹۱ یورو در هر هکتار بوده است، که بیشتر از سود حاصل از کشت انگور (۲۳۷/۴۱ یورو در هر هکتار) است، اما وقتی پالونیا صرفاً برای بیوماس کاشته می‌شود سودآوری بسیار ناچیز (حدود ۴/۲۲ یورو در هر هکتار) دارد. این پژوهش نشان می‌دهد که نوع محصول، قیمت بازار، یارانه و انتخاب استراتژی تولید نقش مهمی در سودآوری اقتصادی دارد (Testa et al., 2022). در آرژانتین نیز تحلیل اقتصادی اکالیپتوس برای تولید بیوماس انرژی نشان داد که در بسیاری از شرایط بدون یارانه طرح از نظر اقتصادی توجیه‌پذیر نیست (Olemberg & Lupi, 2024). مطالعات در هند درباره زراعت صنوبر در سیستم‌های چندمنظوره نیز بهره‌وری اقتصادی و نقش این گونه در کاهش فشار بر جنگل‌های طبیعی و برنامه‌های کاهش کربن را تأیید کرده‌اند (Joshi et al., 2024). علاوه بر این، بررسی‌های مدیریت تراکم و کوددهی صنوبر نشان داده‌اند که روش‌های مدیریتی می‌تواند به‌طور معنی‌داری سود اقتصادی زراعت چوب را تحت تأثیر قرار دهند (Ghezehei et al., 2021). تحلیل اقتصادی انجام‌شده در جنگل‌های دولتی چین نشان داد که سرمایه‌گذاری در کشت صنوبر، بسته به سناریوهای هزینه و درآمد، می‌تواند ارزش خالص فعلی در دامنه تقریبی ۱۰۲۴ تا ۶۹۲۵ دلار آمریکا برای هر هکتار ایجاد کند. افزون بر این، نرخ بازده داخلی این سرمایه‌گذاری بین حدود ۱۳/۲ تا ۲۹/۳ درصد متغیر بود. این پراکندگی تغییرات نشان می‌دهد که بازده اقتصادی صنوبر به‌شدت تحت تأثیر عوامل مدیریتی، سطح هزینه‌های اولیه، قیمت بازار چوب و نرخ تنزیل به‌کاررفته در تحلیل اقتصادی قرار دارد؛ به‌طوری که افزایش اندک در درآمد سالانه یا کاهش جزئی در هزینه زمین می‌تواند منجر به بهبود قابل‌توجه شاخص‌های اقتصادی شود (Wang et al., 2014). در مطالعه‌ای دیگر که در ویتنام بر روی گونه‌های جنگلی انجام شده، ارزش خالص فعلی برای کاشت اکالیپتوس حدود ۱۱۴/۹۶ میلیون دونگ ویتنامی در هر هکتار برآورد گردید و نرخ بازده داخلی بین ۲۵ تا ۳۵ درصد گزارش شد؛ که در مجموع بیانگر سودآوری اقتصادی مثبت و معنادار اکالیپتوس در شرایط مورد بررسی است، به‌ویژه هنگامی که هزینه‌های تأسیس مزرعه و نرخ تنزیل در دامنه‌های متعارف باقی بمانند (Cuong et al., 2020). ارزیابی اقتصادی مزارع پالونیا در اقلیم معتدل اروپا نشان داد که این گونه در سیستم‌های تولیدی ترکیبی (تولید هم‌زمان چوب الوار و تراشه چوب) از پتانسیل اقتصادی قابل‌قبولی برخوردار است و محاسبات انجام شده بر مبنای روش جریان نقدی تنزیل‌شده و شاخص‌های ارزش خالص فعلی، نرخ بازده داخلی و حاشیه سود ناخالص بین ۲۷ تا ۵۵ درصد بیانگر آن بود که سودآوری پالونیا در صورت انتخاب ژنوتیپ‌های سازگار و مدیریت مناسب، میانگین بازدهی سالانه مطلوبی ایجاد می‌کند. افزون بر این، تحلیل حساسیت انجام‌شده در این مطالعه نشان داد که نوسانات قیمت محصول نهایی بیشترین اثرگذاری را بر سودآوری مزرعه دارد و تغییرات هزینه‌های اولیه اثر کمتری بر شاخص‌های اقتصادی برجای می‌گذارد (Negrusier et al., 2025). در بخش دیگری از پژوهش‌های جهانی، اقتصاد کاشت اکالیپتوس در مزارع صنعتی آمریکای جنوبی با هدف تولید چوب مورد استفاده در صنایع خمیرکاغذ مورد ارزیابی قرار گرفت. در این تحقیق، ارزش خالص فعلی، نرخ بازده داخلی، نسبت سود به هزینه و ارزش انتظاری زمین برای تعیین سودآوری بلندمدت مورد استفاده قرار گرفت. نتایج نشان داد، که اکالیپتوس در تراکم کاشت و دوره بهره‌برداری بهینه، توانایی ایجاد بازده اقتصادی قابل توجهی دارد، هرچند سودآوری آن به شدت تحت تأثیر هزینه‌های آب، نهاده‌ها و دوره‌های بازچرخش کاشت قرار می‌گیرد (Silva et al., 2020). در داخل کشور نیز ارزیابی اقتصادی گونه‌های درختی برای زراعت چوب در شمال ایران با استفاده از شاخص ارزش انتظاری زمین به‌عنوان یکی از مهم‌ترین معیارهای اقتصادی برای مدیریت چرخه‌های چندباره تولید چوب انجام شده است. این پژوهش با در نظرگیری هزینه‌های تأسیسات، نگهداری، دوره‌های بهره‌برداری و بازدهی نهایی نشان داد که گونه‌هایی با قابلیت رشد سریع و مقاومت اقلیمی بالاتر، در طول چرخه‌های بهره‌برداری اقتصادی‌تر ظاهر می‌شوند. نتایج این مطالعه تأکید دارد که انتخاب گونه مناسب، طراحی چرخه بهره‌برداری و مدیریت هزینه‌های اولیه از عوامل کلیدی موفقیت اقتصادی در زراعت چوب در ایران محسوب می‌شوند (محمدی و همکاران، ۱۳۹۸). در تحقیقی دیگر، هفت طرح توسعه زراعت چوب در سه استان شمالی و غربی کشور مورد بررسی قرار گرفت. این مطالعه با استفاده از معیار ارزش خالص فعلی، نرخ بازده داخلی و نسبت سود به هزینه نشان داد که شش طرح از مجموع هفت طرح دارای توجیه اقتصادی مثبت بوده‌اند و تنها یک طرح به دلیل افزایش هزینه‌های زمین و فاصله از بازار مصرف بازده مناسبی نداشته است. در میان طرح‌های مورد بررسی، طرح کردکوی در استان گلستان بیشترین عملکرد

اقتصادی را داشته و ارزش خالص فعلی آن برابر با حدود ۲۲۶۰۷۲۶۰ هزار تومان در هر هکتار به‌دست آمده است؛ موضوعی که نشان می‌دهد عوامل منطقه‌ای، دسترسی به صنایع تبدیلی و کاهش هزینه‌های حمل‌ونقل نقش تعیین‌کننده‌ای در سودآوری اقتصادی زراعت چوب در ایران دارند. همچنین این مطالعه تأکید کرده است که استفاده از پساب تصفیه‌شده شهری به جای آب خام می‌تواند با کاهش هزینه‌های آب و حذف هزینه خرید کود نیتروژنه در برخی دوره‌ها، اثر مستقیمی بر افزایش ارزش فعلی خالص و تقویت پایداری اقتصادی داشته باشد (وحیدی و صالح نیا، ۱۴۰۲). مطالعات نشان می‌دهد که گونه‌های مختلف زراعت چوب واکنش متفاوتی نسبت به کیفیت پساب دارند. صنوبر به‌عنوان یکی از گونه‌های سریع‌الرشد پرکاربرد، دارای تحمل متوسط نسبت به شوری بوده و در صورت استفاده از پساب با هدایت الکتریکی کنترل‌شده، کاهش معناداری در رشد آن مشاهده نمی‌شود (Ayer, 1985). پالونیا، اگرچه در مراحل اولیه رشد نسبت به شوری حساس‌تر است، اما در صورت استفاده از پساب با کیفیت مناسب، به دلیل رشد رویشی سریع و نیاز بالای غذایی، می‌تواند از عناصر موجود در پساب به‌طور مؤثر بهره‌برداری کند (Qadir et al., 2010). در مقابل، اکالیپتوس به‌عنوان گونه‌ای مقاوم‌تر نسبت به شوری و تغییرات کیفیت آب، گزینه‌ای مناسب برای استفاده از پساب تصفیه‌شده در اقلیم‌های خشک و نیمه‌خشک محسوب می‌شود و توان بالایی در جذب عناصر و کاهش بار آلاینده‌های آلی پساب از خود نشان می‌دهد (Cha-Um and Kirdmanee; 2008). با وجود مزایای متعدد، بهره‌برداری از پساب تصفیه‌شده در زراعت چوب مستلزم رعایت الزامات فنی، مدیریتی و نظارتی است. عدم کنترل کیفیت پساب و خاک می‌تواند منجر به تجمع نمک‌ها و فلزات سنگین در خاک و کاهش بهره‌وری بلندمدت سامانه تولید شود (Toze, 2006). از این‌رو، تدوین چارچوب‌های اجرایی مبتنی بر استانداردهای معتبر بین‌المللی، انتخاب گونه‌های متناسب با شرایط اقلیمی و کیفیت پساب، و استقرار نظام پایش مستمر، از پیش‌نیازهای اساسی اجرای ایمن و پایدار این رویکرد به شمار می‌رود. در مجموع، آبیاری زراعت چوب با پساب تصفیه‌شده، در صورت مدیریت علمی و رعایت استانداردهای کیفی، می‌تواند به‌عنوان راهکاری کارآمد برای افزایش بهره‌وری آب، کاهش هزینه‌های تولید، ارتقای امنیت منابع چوبی و هم‌زمان حفاظت از منابع آب شیرین کشور مورد توجه قرار گیرد (De Oliveira Silva, 2022).

مرور مطالعات پیشین نشان می‌دهد که اگرچه پژوهش‌های متعددی به بررسی اقتصادی گونه‌های مختلف زراعت چوب یا ارزیابی زیست‌محیطی استفاده از پساب تصفیه‌شده پرداخته‌اند، اما مطالعاتی که این دو جنبه را به‌صورت تلفیقی و در چارچوب تصمیم‌گیری برای انتخاب گونه مناسب مورد ارزیابی قرار دهند، محدود هستند. همچنین اطلاعات اندکی درباره عملکرد اقتصادی و زیست‌محیطی گونه‌های صنوبر، اکالیپتوس و پالونیا تحت شرایط آبیاری با پساب تصفیه‌شده در مناطق نیمه‌خشک ایران وجود دارد. افزون بر این، تأثیر متغیرهای کلیدی اقتصادی نظیر قیمت چوب، هزینه آب، هزینه زمین و هزینه نهال بر پایداری اقتصادی این گونه‌ها به‌طور هم‌زمان بررسی نشده است. از این‌رو، پژوهش حاضر با تلفیق ارزیابی اقتصادی، تحلیل حساسیت و شاخص پایداری محیط‌زیستی، تلاش می‌کند چارچوبی برای اولویت‌بندی گونه‌های زراعت چوب در شرایط استفاده از پساب تصفیه‌شده ارائه دهد.

هدف اصلی این پژوهش، ارزیابی و مقایسه اقتصادی زراعت چوب در منطقه ماهدشت کرج با تمرکز بر سه گونه درختی اکالیپتوس (*Eucalyptus spp.*)، صنوبر (*Populus spp.*) و پالونیا (*Paulownia spp.*) است. در این راستا، پژوهش حاضر با بهره‌گیری از شاخص‌های متعارف تحلیل اقتصادی طرح‌های سرمایه‌گذاری بلندمدت، از جمله ارزش خالص فعلی (NPV)، نسبت سود به هزینه (BCR) و نرخ بازده داخلی (IRR) به تحلیل هزینه‌ها و منافع کشت هر یک از گونه‌ها در شرایط اقلیمی، منابع آبی و ساختار هزینه‌ای منطقه مورد مطالعه می‌پردازد. هدف نهایی، شناسایی گونه درختی دارای بیشترین توجیه‌پذیری اقتصادی و کمترین ریسک سرمایه‌گذاری در چارچوب محدودیت‌های منابع آب و الزامات پایداری محیط‌زیستی منطقه ماهدشت کرج است، به‌گونه‌ای که نتایج پژوهش بتواند به‌عنوان مبنایی علمی برای تصمیم‌گیری سرمایه‌گذاران، بهره‌برداران و سیاست‌گذاران بخش زراعت چوب مورد استفاده قرار گیرد.

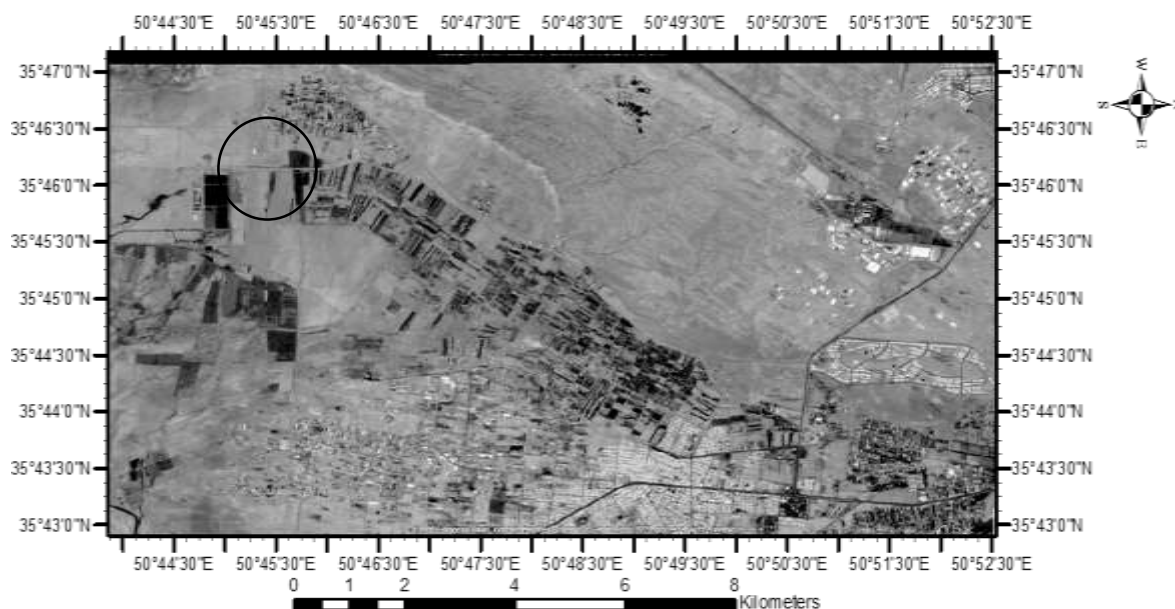
مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

با توجه به ممنوعیت کاشت پالونیا در عرصه‌های ملی جنگلی، محل اجرای طرح در اراضی زراعی ماهدشت انتخاب شد که خارج از محدوده جنگل‌های طبیعی بوده و از منظر حقوقی و محیط‌زیستی مشمول مقررات محدودکننده سازمان جنگل‌ها نمی‌گردد (خبرگزاری ایسنا، ۱۴۰۳). این مکان‌یابی ضمن رعایت ضوابط قانونی، امکان بهره‌گیری از پتانسیل پالونیا به‌عنوان گونه‌ای با بازده اقتصادی بالا و چرخه تولید کوتاه را فراهم می‌سازد و در راستای کاهش فشار بهره‌برداری از جنگل‌های شمال کشور قابل دفاع است. ماهدشت در 50 درجه و 53 دقیقه طول غربی و 35 درجه 46 دقیقه عرض شمالی واقع شده است (شهبازی و همکاران، ۱۳۹۶). شهر ماهدشت در جنوب غربی شهرستان کرج در

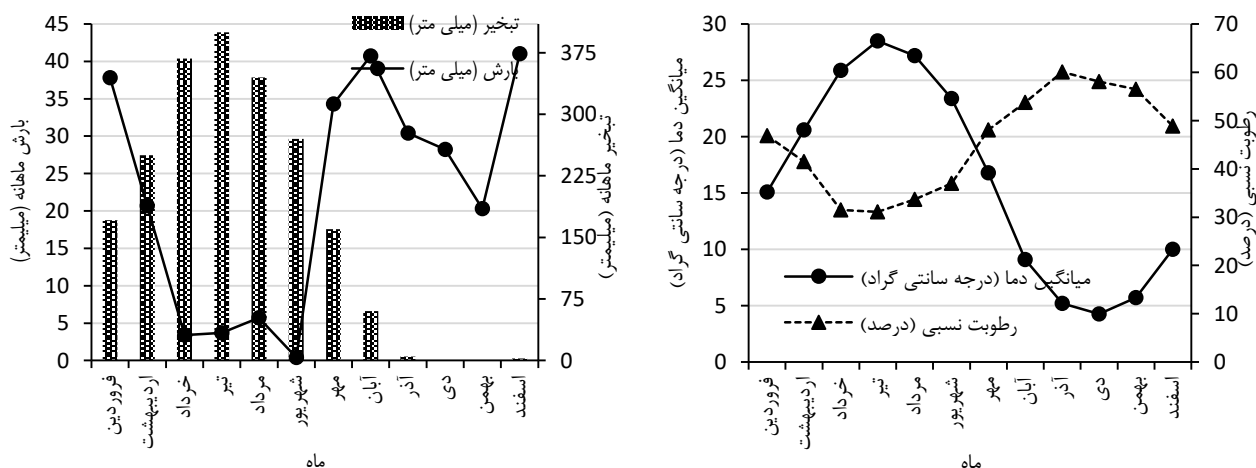


غرب استان البرز واقع شده است که از شمال به فرودگاه پیام و سازمان فضایی ایران و از جنوب به شهرستان ملارد از شرق به محمد شهر و از غرب به اشتهارد منتهی می‌شود که در مجموع ۶۱۱۶ هکتار می‌باشد (شکل ۱).



شکل ۱. محل قرارگیری تصفیه خانه ماهدشت (دایره مشکی رنگ)

تحلیل داده‌های بلندمدت ایستگاه سینوپتیک کرج نشان‌دهنده نوسانات فصلی آشکار در پارامترهای اقلیمی منطقه ماهدشت است. بررسی روند دمایی حاکی از صعود تدریجی دما از زمستان به تابستان است؛ به‌طوری‌که میانگین دما از کمینه ۴/۲۷ درجه سانتی‌گراد در دی‌ماه به بیشینه ۲۸/۵۰ درجه در تیرماه می‌رسد (شکل ۲). در مقابل، رطوبت نسبی رفتاری معکوس با دما نشان می‌دهد و در گرم‌ترین ماه سال (تیر)، به حداقل مقدار خود (۱/۳۱ درصد) کاهش می‌یابد. هم‌پوشانی این افت رطوبتی با اوج دمای تابستانه، پتانسیل تبخیر را به‌شدت بالا برده و منحنی تبخیر ماهانه را در فصول گرم به نقطه اوج می‌رساند. از سوی دیگر، رژیم بارندگی منطقه عمدتاً متمرکز بر فصول سرد (پاییز و زمستان) است و در دوره رویش گیاه، نزولات جوی به حداقل می‌رسد. تقارن زمانی اوج نیاز آبی گیاه با حداقل بارش و حداکثر تبخیر، بیانگر بیابان منفی آب در فصل رشد است و ضرورت حیاتی آبیاری تکمیلی را برای موفقیت طرح‌های زراعت چوب در این اقلیم اثبات می‌کند.



شکل ۲. تغییرات ماهانه پارامترهای اقلیمی (دما، رطوبت نسبی، تبخیر و بارش) منطقه ماهدشت بر اساس داده‌های میانگین ایستگاه سینوپتیک کرج (سال ۱۳۹۰ تا ۱۴۰۳)

روش ارزیابی اقتصادی

در این مطالعه، کارایی اقتصادی زراعت چوب سه گونه اکالیپتوس، صنوبر و پالونیا در ماهدشت کرج با رویکردهای پویا (تنزیلی) ارزیابی شد (شادمانی و صالح، ۱۳۸۶). هرچند در مرحله اولیه، شاخص‌های ایستا مانند دوره بازگشت سرمایه برای شناسایی الگوی هزینه‌ها به کار رفت، اما به دلیل نادیده گرفتن ارزش زمانی پول، برای قضاوت نهایی کنار گذاشته شد. جریان‌های نقدی سالانه - شامل هزینه‌های استقرار (آماده‌سازی زمین، نهال و کاشت)، هزینه‌های عملیاتی (آبیاری، کود، آفات) و درآمد برداشت - با نرخ تنزیل ۱۵ درصد (هزینه فرصت سرمایه‌گذاری) به ارزش فعلی تبدیل گردید. بر این مبنا، شاخص‌های کلیدی ارزش فعلی خالص^۱ (NPV)، نرخ بازده داخلی^۲ (IRR) و نسبت سود به هزینه^۳ (BCR) محاسبه شد. در ارزیابی اقتصادی، نرخ تنزیل ۱۵ درصد به عنوان هزینه فرصت سرمایه در بخش کشاورزی و زراعت چوب در نظر گرفته شد. انتخاب این نرخ بر اساس مطالعات پیشین ارزیابی اقتصادی پروژه‌های منابع طبیعی و شرایط متعارف سرمایه‌گذاری در بخش کشاورزی ایران انجام گرفت (شادمانی و صالح، ۱۳۸۶). با توجه به نوسانات تورمی اقتصاد ایران، نرخ تنزیل مورد استفاده به عنوان نرخ واقعی در نظر گرفته شد و کلیه هزینه‌ها و درآمدها بر مبنای قیمت‌های ثابت محاسبه شدند. همچنین به منظور بررسی پایداری نتایج اقتصادی در شرایط مختلف اقتصادی، تحلیل حساسیت شاخص‌های NPV، IRR و BCR نسبت به تغییرات نرخ تنزیل در دامنه ۰ تا ۳۰ درصد انجام شد.

ارزش خالص فعلی به عنوان معیار اصلی، تفاضل ارزش فعلی درآمدها و هزینه‌ها را نشان می‌دهد؛ مقادیر مثبت، توجیه‌پذیری طرح را تأیید می‌کند (Gabriel Filho et al., 2016). **نرخ بازده داخلی**، نرخ تعادل صفر ارزش خالص فعلی را تعیین کرده و با مقایسه نرخ تنزیل، جذابیت سرمایه‌گذاری را می‌سنجد (Juhász et al., 2011). **نسبت سود به هزینه** نیز کارایی تخصیص منابع را با نسبت منافع به هزینه‌ها ارزیابی می‌کند؛ **نسبت سود به هزینه** بزرگتر از یک اولویت‌بندی را تسهیل می‌نماید (Buncle et al., 2013). این شاخص‌ها از روابط استاندارد (۱) تا (۳) استخراج شدند و امکان رتبه‌بندی دقیق گونه‌ها را فراهم ساختند.

$$NPV = \sum_{t=1}^n \frac{I_t}{(1+i)^t} - \sum_{t=1}^n \frac{C_t}{(1+i)^t} = \sum_{t=1}^n \frac{P_t}{(1+i)^t} - TC \quad \text{رابطه ۱}$$

$$IRR = \sum_{t=1}^n \frac{I_t}{(1+i)^t} - \sum_{t=1}^n \frac{C_t}{(1+i)^t} = 0 \quad \text{رابطه ۲}$$

$$BCR = \frac{\sum_{t=1}^n \frac{I_t}{(1+i)^t}}{\sum_{t=1}^n \frac{C_t}{(1+i)^t}} \quad \text{رابطه ۳}$$

که در آن‌ها: I_t درآمد سال t ام، i نرخ تنزیل، C_t هزینه‌های سال t ام، P_t جریان نقدی خالص زمان t و TC هزینه‌های اولیه سرمایه‌گذاری است.

به منظور ارزیابی اقتصادی و زیست‌محیطی زراعت چوب، الگوی کاشت با فاصله ۲ متر روی ردیف و ۲/۵ متر بین ردیف‌ها در نظر گرفته شد که تراکم تقریبی ۲۰۰۰ اصله درخت در هکتار را فراهم می‌کند. تأمین آب از طریق پساب تصفیه‌شده خروجی تصفیه‌خانه و با استفاده از سیستم آبیاری قطره‌ای انجام شد. انتخاب سیستم آبیاری قطره‌ای به دلیل راندمان بالاتر مصرف آب، کاهش تلفات انتقال و توزیع و کنترل بهتر کاربرد پساب صورت گرفت. نیاز آبی گونه‌های صنوبر، اکالیپتوس و پالونیا بر اساس ویژگی‌های رشدی و فیزیولوژیکی هر گونه و با استفاده از اطلاعات فنی و مطالعات معتبر مرتبط تعیین شد. بنابراین، نیاز آبی برای گونه‌ها یکسان فرض نشد و در محاسبات اقتصادی، هزینه تأمین و مصرف آب متناسب با نیاز آبی هر گونه لحاظ گردید. جریان نقدی سالانه هر گونه بر اساس تفاوت بین هزینه‌ها و درآمدهای مورد انتظار طی دوره بهره‌برداری محاسبه شد. هزینه‌ها شامل هزینه زمین، تهیه نهال، کاشت، آبیاری با پساب تصفیه‌شده، نگهداری، برداشت و حمل بود، در حالی که درآمدها بر اساس حجم چوب قابل برداشت و قیمت بازار چوب برآورد شدند. تمامی مقادیر بر حسب قیمت‌های ثابت سال پایه محاسبه و سپس با استفاده از نرخ تنزیل ۱۵ درصد به ارزش فعلی تبدیل شدند. در نهایت، با استفاده



هم‌زمان این شاخص‌ها، مقایسه‌ای جامع میان سه گونه اکالیپتوس، صنوبر و پالونیا انجام شد تا مناسب‌ترین

جدول ۱. پارامترهای مورد نیاز برای سه گونه صنوبر، اکالیپتوس و پالونیا در زراعت چوب در منطقه ماهدشت

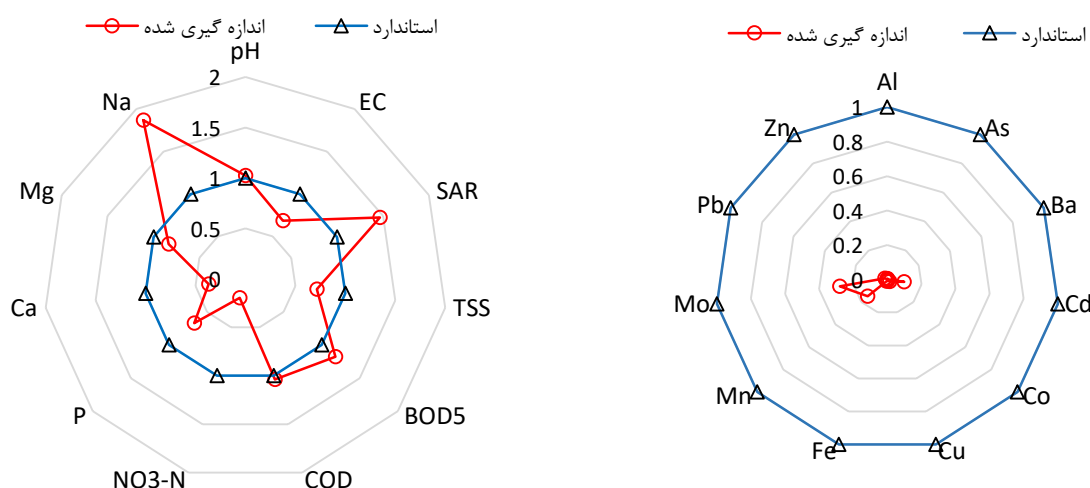
گونه درختی	حجم آب مورد نیاز (متر مکعب بر هکتار)	هزینه پساب (ریال بر مترمکعب)	قیمت نهال (ریال بر هر نهال)	عملکرد چوب (کیلوگرم بر هر درخت)	قیمت چوب (میلیون ریال بر تن)
صنوبر	۸۵۰۰	۳۵۰۰۰۰	۸۰۰۰۰	۳۰۰	۱۰۰
	http://isna.ir/xdVyXt	http://isna.ir/xdVyXt	http://irma.ir/xjTkKm	/https://markazkade.ir	http://irma.ir/xjV9hL
اکالیپتوس	۱۴۰۰۰	۳۵۰۰۰۰	۱۵۰۰۰	۳۵۰	۱۵۰
	http://isna.ir/xdVyXt	http://isna.ir/xdVyXt	http://irma.ir/xjTkKm	http://isna.ir/xdV5Jg	http://isna.ir/xdV5Jg
پالونیا	۸۰۰۰	۳۵۰۰۰۰	۱۰۰۰۰۰	۳۰۰	۲۰۰
	http://isna.ir/xdVyXt	http://isna.ir/xdVyXt	http://irma.ir/xjvwBL	https://paliznahal.ir/the-fruiting-of-the-paulownia-tree	https://www.runx.ir/Paulownia-wood-price

شاخص‌های NPV، IRR و BCR بر مبنای جریان نقدی تجمعی پروژه محاسبه گردیدند و تحلیل حساسیت در متغیرهای کلیدی اقتصادی انجام شد.

آب آبیاری

به‌کارگیری پساب تصفیه‌شده در زراعت چوب در صورتی قابل‌اتکا و پایدار است که کیفیت آن به‌طور مستمر پایش و در حدود استانداردهای فنی نگه‌داشته شود. در خصوص اطلاعات کیفیت پساب خروجی تصفیه‌خانه ماهدشت از تحقیق ابراهیمیان و همکاران (۲۰۲۴) استفاده شد. مقادیر غلظت عناصر و پارامترهای شیمیایی در شکل (۳) به‌صورت نسبت به مقادیر استاندارد و بی‌بعد نمایش داده شده‌اند تا امکان مقایسه مستقیم اثر هر پارامتر بر پایداری زراعت چوب فراهم گردد. نتایج مقایسه شاخص‌های کیفی پساب ماهدشت با حدود مجاز نشان می‌دهد که این منبع آبی از نظر شوری کل، اسیدیته، کلسیم، منیزیم و عناصر غذایی اصلی در محدوده مطلوب قرار دارد (شکل ۳) و از این منظر ریسک اولیه شوری و کمبود تغذیه‌ای برای گونه‌هایی مانند پالونیا، اکالیپتوس و صنوبر پایین است. با این حال، سدیم، نسبت جذب سدیم، بار آلی (COD و BOD) و مواد معلق نزدیک یا بالاتر از آستانه‌های توصیه‌شده هستند (Ayers and Westcot, 1985)؛ عاملی که در صورت مدیریت‌نشدن می‌تواند به تدریج نفوذپذیری خاک را کاهش داده، هوادهی ناحیه ریشه را مختل و رشد حجمی درختان را در سال‌های انتهایی تضعیف کند. بنابراین، کاربرد اقداماتی مانند اختلاط پساب با آب شیرین، مصرف اصلاح‌کننده‌های کلسیمی، پیش‌فیلتراسیون و تنظیم برنامه آبیاری برای حفظ پایداری خاک و تداوم رشد ضروری است. در بخش عناصر بالقوه سمی، ارزیابی‌های فلزات سنگین نشان می‌دهد که غلظت تمامی عناصر اندازه‌گیری‌شده (از جمله کادمیم، سرب و آرسنیک) به‌طور قابل‌توجهی کمتر از حدود استانداردهای بین‌المللی (FAO, 1989; WHO, 1989; EPA, 1977) است (شکل ۳) و فاصله ایمنی قابل‌توجهی با آستانه‌های خطر وجود دارد. این موضوع نشان می‌دهد که پساب مورد استفاده از نظر ریسک انباشت فلزات و انتقال به بافت گیاهی در دوره‌های طولانی، وضعیت کاملاً مطلوبی دارد و تهدیدی جدی برای سلامت خاک، گیاه و زنجیره غذایی ایجاد نمی‌کند.

در مجموع، پساب ماهدشت از نظر شوری، اسیدیته و بار فلزی برای زراعت چوب مناسب ارزیابی می‌شود؛ اما کنترل سیستماتیک سدیم، نسبت جذب سدیم، مواد معلق و بار آلی شرط اصلی حفظ عملکرد اقتصادی و محیط‌زیستی مزرعه در بلندمدت است. زیرا، همان‌گونه که Qadir و همکاران (۲۰۱۰) و Heyde و همکاران (۲۰۲۵) گزارش کرده‌اند، استفاده بلندمدت از پساب ممکن است با مخاطراتی نظیر تجمع املاح، افزایش شوری و سدیمی شدن خاک همراه باشد. بنابراین، استمرار بهره‌برداری از این سیستم‌ها مستلزم پایش مستمر کیفیت پساب، مدیریت مناسب آبیاری و اجرای برنامه‌های حفاظتی خاک است. در شرایط تشدید کمبود آب در آینده نیز تخصیص پساب به زراعت چوب باید در چارچوب مدیریت یکپارچه منابع آب و با در نظر گرفتن رقابت میان بخش‌های مختلف مصرف‌کننده مورد ارزیابی قرار گیرد.



شکل ۳. مقادیر میانگین پارامترهای کیفی و غلظت فلزات سنگین پساب خروجی تصفیه خانه فاضلاب ماهدشت در فصول مختلف بر اساس اطلاعات آبفای البرز نسبت به استاندارد فائو

آنالیز حساسیت

تحلیل حساسیت یک متغیره برای سنجش پایداری نتایج و شناسایی متغیرهای کلیدی، بر هزینه های زمین، آب (پساب)، نهال و قیمت چوب با دامنه تغییرات $\pm 10\%$ ، $\pm 20\%$ و $\pm 30\%$ درصد اعمال و سایر پارامترها ثابت ماندند (Chen, 2024). جریان های نقدی هر سناریو مجدداً با نرخ تنزیل ۱۵ درصد محاسبه و شاخص های ارزش فعلی خالص، نرخ بازده داخلی و نسبت سود به هزینه استخراج گردید تا نوسانات خروجی اقتصادی مشخص شود. این رویکرد، اثر مستقل هر ورودی را تفکیک کرده و گونه های حساس را از تاب آور متمایز می سازد.

اثر فاصله تصفیه خانه تا محل کشت بر محاسبات اقتصادی

فاصله مزرعه از تصفیه خانه به عنوان یکی از مهم ترین متغیرهای مؤثر بر هزینه تأمین پساب و در نتیجه پایداری اقتصادی زراعت چوب در نظر گرفته شد. در این پژوهش، سه سناریوی فاصله شامل ۳ کیلومتر (حداقل فاصله عملیاتی)، ۷ کیلومتر (فاصله متعارف) و ۱۰ کیلومتر (حداکثر فاصله اقتصادی مورد بررسی) تعریف گردید. هزینه انتقال پساب در هر سناریو بر اساس تعرفه های بهره برداری و هزینه های واقعی تأمین و انتقال پساب محاسبه شد که به طور ضمنی هزینه های پمپاژ، مصرف انرژی، استهلاک تجهیزات، نگهداری و بهره برداری شبکه انتقال را در بر می گیرد. با توجه به اینکه محدوده مورد مطالعه در دشت ماهدشت دارای توپوگرافی نسبتاً هموار و اختلاف ارتفاع ناچیز است، اثر تغییرات ارتفاعی بر هزینه انتقال در مقایسه با اثر فاصله ناچیز فرض شد. همچنین به منظور ایزوله سازی اثر فاصله، سایر متغیرهای مؤثر شامل کیفیت پساب، سیستم آبیاری، نیاز آبی گونه ها، تراکم کاشت و شرایط مدیریتی در تمامی سناریوها ثابت نگه داشته شد. سپس هزینه های سالانه انتقال به جریان نقدی پروژه اضافه و شاخص های ارزش خالص فعلی، نرخ بازده داخلی و نسبت سود به هزینه با نرخ تنزیل ثابت محاسبه گردید. هدف این تحلیل، طراحی هیدرولیکی سامانه انتقال نبود، بلکه ارزیابی اثر اقتصادی افزایش فاصله از منبع تأمین پساب و تعیین آستانه اقتصادی قابل قبول برای استقرار مزارع زراعت چوب بود. نتایج حاصل می تواند به عنوان مبنایی برای مکان یابی بهینه اراضی و تصمیم گیری سرمایه گذاران و مدیران منابع آب در توسعه سامانه های استفاده مجدد از پساب مورد استفاده قرار گیرد. با توجه به اینکه هدف مطالعه حاضر ارزیابی اقتصادی زراعت چوب از دیدگاه سرمایه گذار و بهره بردار نهایی بوده است، از محاسبه مستقل اجزای فنی شبکه انتقال نظیر توان پمپ، افت فشار، قطر لوله و راندمان تجهیزات صرف نظر شد و هزینه انتقال به صورت هزینه واحد تأمین پساب وارد محاسبات اقتصادی گردید. این رویکرد امکان برآورد واقع بینانه تر هزینه های بهره برداری و مقایسه اقتصادی گونه های مورد مطالعه را فراهم می سازد.

ارزیابی جامع محیط زیستی

به منظور ارزیابی جامع پایداری محیط زیستی زراعت چوب مبتنی بر آبیاری با پساب تصفیه شده، در این پژوهش از یک شاخص مرکب

تحت عنوان شاخص پایداری زیست محیطی کل (ESI) استفاده شد. به کارگیری شاخص های مرکب یکی از رویکردهای پذیرفته شده در مطالعات ارزیابی پایداری سیستم های کشاورزی و جنگل کاری است، زیرا این شاخص ها امکان تجمیع هم زمان چندین معیار محیط زیستی ناهمگون را در قالب یک شاخص عددی واحد فراهم کرده و مقایسه کمی گزینه های مدیریتی و زیستی مختلف را تسهیل می کنند. در این چارچوب، شاخص پایداری محیط زیستی کل با هدف مقایسه میزان سازگاری سه گونه صنوبر، اکالیپتوس و پالونیا با شرایط اقلیمی- محیط زیستی منطقه ماهدشت و محدودیت منابع آب طراحی شد. انتخاب زیرشاخص ها بر اساس ادبیات علمی مرتبط با آبیاری با پساب، مدیریت منابع آب، پایداری خاک و ارزیابی ریسک های اکولوژیک گونه های سریع الرشد صورت گرفت. امتیازدهی شاخص های محیط زیستی بر اساس دامنه های کمی گزارش شده در منابع معتبر علمی انجام شد و با تبدیل این دامنه ها به طبقات کیفی، امتیاز عددی ۱ تا ۵ به هر شاخص اختصاص یافت. این رویکرد مبتنی بر شواهد، یکی از روش های پذیرفته شده در ارزیابی پایداری سیستم های زراعی و جنگل کاری است. در این پژوهش وزن دهی یکسان برای تمامی زیرشاخص ها در نظر گرفته شد، زیرا هدف اصلی مقایسه نسبی گونه ها و جلوگیری از ورود سوگیری ناشی از قضاوت های ذهنی در تعیین وزن ها بود. در شرایطی که شواهد علمی کافی برای برتری قطعی یک شاخص نسبت به سایر شاخص ها وجود نداشته باشد، استفاده از وزن های مساوی یکی از رویکردهای پذیرفته شده در مطالعات شاخص های مرکب پایداری محسوب می شود. (Sabiha et al., 2016) به همین دلیل از روش های مبتنی بر نظر خبرگان نظیر AHP یا Delphi استفاده نشد تا نتایج از وابستگی به ترکیب خبرگان و قضاوت های فردی مصون بماند.

در این مطالعه، پنج زیرشاخص کلیدی شامل نیاز آبی سالانه، تحمل شوری و کیفیت پساب، اثرات بالقوه بر خاک (شوری، سدیمی شدن و کاهش نفوذپذیری)، ریسک اکولوژیک و تهاجمی بودن گونه، و سازگاری با سیاست های حفاظتی و محدودیت های قانونی انتخاب گردید. زیرشاخص ریسک اکولوژیک و تهاجمی بودن بر اساس شواهد منتشر شده در ادبیات علمی، سابقه مدیریتی گونه ها، احتمال گسترش خارج از عرصه های کشت و میزان محدودیت های قانونی یا حفاظتی مرتبط با توسعه هر گونه تعیین شد (Lugli et al., 2023; Kadlec et al., 2026). لازم به ذکر است که این زیرشاخص بیانگر ریسک بالقوه بوده و لزوماً به معنای وقوع یا اثبات تهاجم زیستی در منطقه مورد مطالعه نیست. این زیرشاخص ها نماینده مهم ترین فشارهای محیط زیستی مرتبط با زراعت چوب در شرایط استفاده از منابع آب نامتعارف بوده و در مطالعات مشابه نیز به عنوان معیارهای اصلی پایداری معرفی شده اند. برای کمی سازی هر یک از زیرشاخص ها، سیستم امتیازدهی کیفی- کمی در بازه عددی ۱ تا ۵ به کار گرفته شد؛ به طوری که امتیاز ۱ نشان دهنده شرایط نامطلوب و ریسک محیط زیستی بالا، و امتیاز ۵ بیانگر وضعیت بسیار مطلوب و ریسک پائین محیط زیستی بود. استفاده از مقیاس پنج درجه ای در ارزیابی پایداری، به دلیل توازن مناسب میان دقت تحلیلی و سادگی تفسیر، در ادبیات علمی به طور گسترده توصیه شده است (Sabiha et al., 2016). پس از تخصیص امتیاز به هر زیرشاخص، امتیاز خام پایداری محیط زیستی هر گونه به صورت مجموع ساده امتیازهای پنج گانه محاسبه شد. در این حالت، حداقل امتیاز خام برابر با ۵ و حداکثر آن برابر با ۲۵ است. این روش تجمیع ساده، زمانی که وزن دهی یکسان برای شاخص ها در نظر گرفته می شود، به عنوان رویکردی شفاف و قابل دفاع در مطالعات مقایسه ای توصیه شده است. به منظور افزایش تفسیرپذیری نتایج و امکان مقایسه مستقیم بین گونه ها، امتیازهای خام به مقیاس ۰ تا ۱۰ با استفاده از رابطه (۴) نرمال سازی شدند.

$$ESI = \frac{\text{مجموع امتیاز شاخص ها}}{25} \times 10 \quad \text{رابطه (۴)}$$

نرمال سازی شاخص های مرکب یکی از مراحل کلیدی در تحلیل پایداری محسوب می شود، زیرا از یک سو مانع سوگیری ناشی از مقیاس های متفاوت می شود و از سوی دیگر، ارائه نتایج را برای تصمیم گیران تسهیل می کند. در این پژوهش، نرمال سازی با تقسیم امتیاز خام بر حداکثر مقدار ممکن (۲۵) و ضرب در عدد ۱۰ انجام گرفت. انتخاب مقیاس ۱۰ برای شاخص نهایی پایداری محیط زیستی با هدف افزایش شفافیت، خوانایی و هم راستایی با شاخص های اقتصادی رایج صورت گرفت. این مقیاس به طور گسترده در مطالعات ارزیابی پایداری محیط زیستی و منابع طبیعی مورد استفاده قرار می گیرد و امکان درک شهودی نتایج و مقایسه آسان بین سناریوها و گونه ها را فراهم می کند (Sabiha et al., 2016). در نهایت، مقادیر شاخص پایداری محیط زیستی کل به صورت طبقه بندی شده تفسیر شدند، به طوری که مقادیر کمتر از ۴ نشان دهنده پایداری محیط زیستی ضعیف، مقادیر بین ۴ تا ۶ بیانگر پایداری متوسط، مقادیر بین ۶ تا ۸ معرف پایداری مطلوب و مقادیر بالاتر از ۸ نشان دهنده پایداری محیط زیستی بسیار مطلوب تلقی شدند.

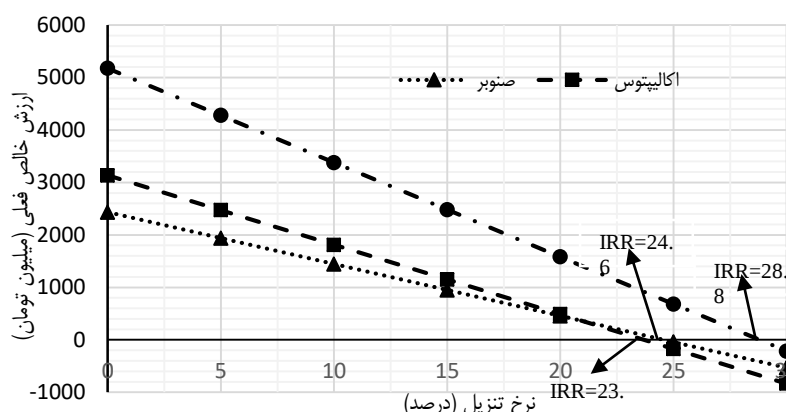
نتایج

نتایج تحلیل اقتصادی زراعت چوب در مقیاس دو هکتار برای اکالیپتوس، صنوبر و پالونیا نشان می‌دهد که تفاوت‌های معناداری در ساختار هزینه، زمان بازگشت سرمایه و شاخص‌های اقتصادی میان این گونه‌ها وجود دارد (جدول ۲). اکالیپتوس به دلیل رشد سریع، دوره بهره‌برداری کوتاه و تولید حجم بالای چوب صنعتی، جریان نقدی یکنواخت‌تری ایجاد می‌کند؛ هرچند هزینه‌های اولیه استقرار آن به علت نیاز آبی بالاتر بیشتر از صنوبر است، اما درآمد حاصل از برداشت نهایی این هزینه‌ها را جبران کرده و در نتیجه ارزش خالص فعلی ۱۱۵۰ میلیون تومان، نرخ بازده داخلی ۲۳/۷ درصد و نسبت سود به هزینه ۱/۳۲ نشان می‌دهد که این گونه از منظر اقتصادی جذاب و قابل توجه است؛ با این حال وابستگی بالا به منابع آبی، ریسک اجرایی آن را افزایش می‌دهد. صنوبر با وجود هزینه‌های استقرار و نگهداری کمتر و سازگاری اقلیمی بالا، به دلیل دوره بهره‌برداری طولانی‌تر بازگشت سرمایه کندتری دارد؛ ارزش خالص فعلی مثبت اما کمتر از اکالیپتوس، نرخ بازده داخلی نزدیک به نرخ تنزیل ۱۵ درصد و نسبت سود به هزینه کمی بالاتر از یک بیانگر سودآوری اقتصادی با شدت کمتر و جذابیت مالی محدودتر است، هرچند پایداری و ریسک پایین‌تر آن می‌تواند برای بهره‌برداران محافظه‌کار گزینه مناسبی باشد. پالونیا به رغم هزینه‌های اولیه بالاتر ناشی از قیمت نهال و نیاز به مدیریت دقیق، به دلیل رشد بسیار سریع، دوره بهره‌برداری کوتاه و ارزش بالای چوب بیشترین جریان نقدی و بالاترین ارزش خالص فعلی و نرخ بازده داخلی فراتر از نرخ تنزیل را در بین گونه‌ها ایجاد می‌کند (به ترتیب ۲۴۸۰ میلیون تومان و ۲۸/۸ درصد)؛ همچنین بیشترین نسبت سود به هزینه نشان‌دهنده کارایی اقتصادی و سودآوری خالص برتر آن است که با نتایج گزارش‌شده در منابع پیشین همخوانی دارد (Testa et al., 2022). در مجموع، پالونیا بالاترین پتانسیل اقتصادی، اکالیپتوس جذابیت مالی مناسب با ریسک آبی بیشتر، و صنوبر سودآوری متوسط با ثبات اجرایی بالاتر را ارائه می‌دهد. برتری اقتصادی پالونیا در این مطالعه با نتایج Testa و همکاران (۲۰۲۲) همخوانی دارد که سودآوری بالای این گونه را در شرایط مدیریتانه‌ای گزارش کردند. همچنین عملکرد اقتصادی مناسب اکالیپتوس با یافته‌های Olemborg and Lupi (۲۰۲۴) مطابقت دارد که هزینه تأمین آب و هزینه‌های عملیاتی را از عوامل اصلی تعیین‌کننده سودآوری این گونه معرفی کردند. از سوی دیگر، نتایج مربوط به صنوبر با مطالعات Joshi و همکاران (۲۰۲۴) و Wang و همکاران (۲۰۱۴) همسو است که اگرچه بازده اقتصادی پایین‌تری نسبت به گونه‌های سریع‌الرشد گزارش کرده‌اند، اما بر پایداری و قابلیت سازگاری بالاتر این گونه تأکید داشته‌اند.

جدول ۲. مقادیر ارزش خالص فعلی، نرخ بازده داخلی و نسبت سود به هزینه برای صنوبر، اکالیپتوس و پالونیا در منطقه ماهدشت

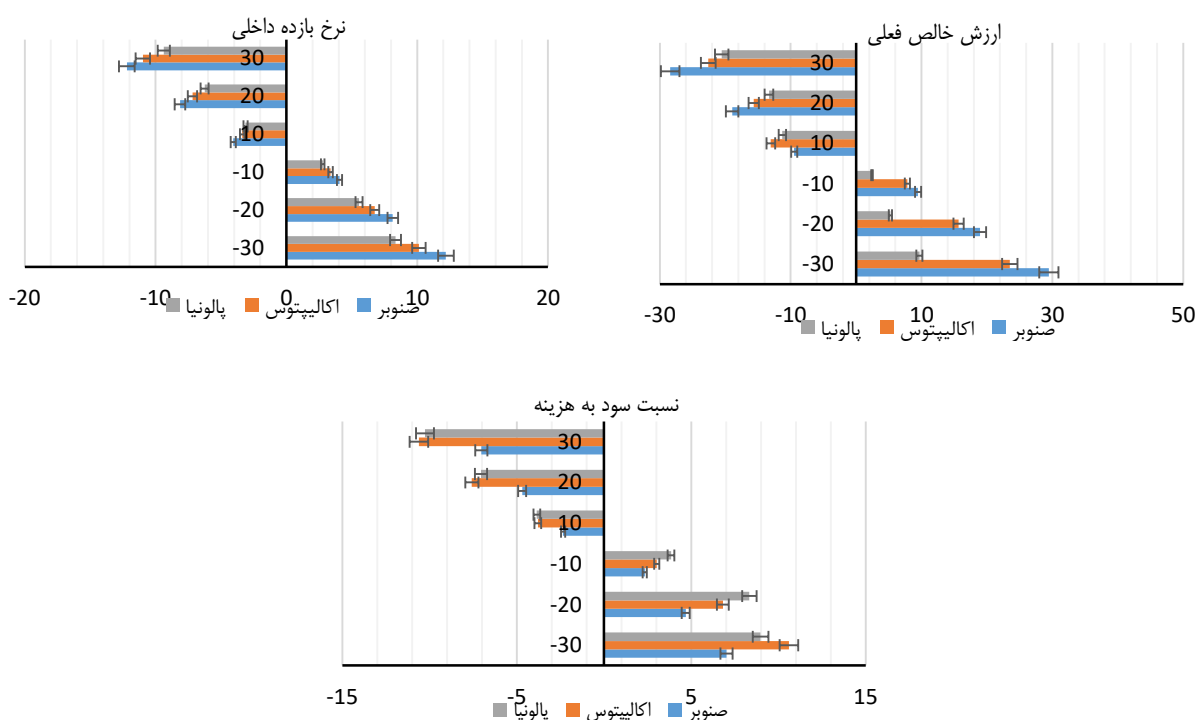
گونه درختی	دوره بهره‌برداری (سال)	کل هزینه سرمایه گذاری (میلیون تومان)	درآمد ناخالص نهایی (میلیون تومان)	ارزش خالص فعلی (میلیون تومان)	نرخ بازده داخلی (درصد)	نسبت سود به هزینه
صنوبر	۷	۳۹۰۰	۶۸۰۰	۹۵۰	۲۴/۶	۱/۲۸
اکالیپتوس	۷	۴۹۰۰	۸۲۰۰	۱۱۵۰	۲۳/۷	۱/۳۲
پالونیا	۷	۵۴۰۰	۱۰۷۰۰	۲۴۸۰	۲۸/۸	۱/۵۶

شکل (۳) ارزش خالص فعلی سه گونه پالونیا، اکالیپتوس و صنوبر را در مقابل نرخ تنزیل نشان می‌دهد. مطابق شکل پالونیا بالاترین ارزش خالص فعلی را در تمام سطوح نرخ تنزیل حفظ می‌کند و نرخ بازده داخلی آن ۲۸/۸ درصد برآورد شده است، که بیانگر بازگشت سریع سرمایه و حاشیه اطمینان اقتصادی بالاتر است. صنوبر با نرخ بازده داخلی برابر ۲۴/۶ درصد و اکالیپتوس با نرخ بازده داخلی حدود ۲۳/۷ درصد عملکرد پایین‌تری دارند. از نمودار مشخص است که با افزایش نرخ تنزیل، ارزش خالص فعلی هر سه گونه کاهش می‌یابد، اما پالونیا حتی در نرخ‌های بالاتر نیز مقادیر مثبت قابل توجهی از ارزش خالص فعلی دارد. این شکل به وضوح نشان می‌دهد که پالونیا هم از نظر سودآوری مطلق و هم از نظر پایداری اقتصادی در برابر تغییرات نرخ تنزیل برتری دارد و انتخاب آن به عنوان گونه اول توسعه زراعت چوب توجیه‌پذیر است.



شکل ۴. ارزش خالص فعلی در مقابل نرخ تنزیل در سه گونه سنوبر، اکالیتوس و پالونیا

نتایج تحلیل حساسیت نشان داد که تغییرات هزینه زمین اثر مستقیم و معکوسی بر شاخص‌های اقتصادی هر سه گونه دارد، به‌طوری‌که با افزایش قیمت زمین از ۳۰- به ۳۰+ درصد، مقادیر ارزش خالص فعلی، نرخ بازده داخلی و نسبت سود به هزینه در تمامی گونه‌ها روندی کاهشی اما منظم را تجربه می‌کنند (جدول ۳). با این حال، در تمام سناریوها نسبت سود به هزینه بزرگ‌تر از یک باقی مانده است که بیانگر تداوم توجیه‌پذیری اقتصادی طرح‌ها حتی در شرایط افزایش قابل‌توجه هزینه زمین است. در میان گونه‌های مورد بررسی، پالونیا بالاترین مقادیر ارزش خالص فعلی (۱۹۷۰ تا ۲۷۲۰ میلیون تومان) و نرخ بازده داخلی (۲۶/۱ تا ۳۱/۲ درصد) را به خود اختصاص داده و کمترین میزان افت را در برابر افزایش هزینه زمین نشان می‌دهد (شکل ۵)؛ این امر بیانگر ارزش افزوده بالا، رشد سریع و تاب‌آوری اقتصادی بیشتر این گونه در مقایسه با دو گونه دیگر است. اکالیتوس از نظر شاخص‌های اقتصادی در جایگاه میانی قرار داشته و رفتاری متعادل از نظر سودآوری و حساسیت به هزینه زمین نشان می‌دهد، در حالی‌که سنوبر بیشترین کاهش شاخص‌های اقتصادی را با افزایش قیمت زمین تجربه کرده و وابستگی بیشتری به ارزان بودن زمین دارد (شکل ۵). در مجموع، نتایج بیانگر آن است که هزینه زمین یک عامل محدودکننده مهم در سودآوری زراعت چوب محسوب می‌شود، اما انتخاب گونه‌های با بهره‌وری زیستی و اقتصادی بالاتر، به‌ویژه پالونیا، می‌تواند اثر افزایش قیمت زمین را تا حد زیادی خنثی کرده و پایداری اقتصادی طرح را حفظ کند.



شکل ۵. درصد تغییر ارزش خالص فعلی، نرخ بازده داخلی و نسبت سود به هزینه در ازاء افزایش و کاهش ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد هزینه زمین زراعی در مقایسه با شرایط فعلی

جدول ۳. تاثیر تغییر قیمت زمین زراعی بر ارزش خالص فعلی، نرخ بازده داخلی و نسبت سود به هزینه

تغییر هزینه زمین (درصد)	ارزش خالص فعلی (میلیون تومان)			نرخ بازده داخلی (درصد)			نسبت سود به هزینه (بدون بعد)		
	سنوبر	اکالیپتوس	پالونیا	سنوبر	اکالیپتوس	پالونیا	سنوبر	اکالیپتوس	پالونیا
-۳۰	۱۲۳۰	۱۴۲۰	۲۷۲۰	۲۷/۶	۲۶/۱	۳۱/۲	۱/۳۷	۱/۴۶	۱/۷۰
-۲۰	۱۱۳۰	۱۳۳۰	۲۶۱۰	۲۶/۶	۲۵/۳	۳۰/۴	۱/۳۴	۱/۴۱	۱/۶۹
-۱۰	۱۰۴۰	۱۲۴۰	۲۵۴۰	۲۵/۶	۲۴/۵	۲۹/۶	۱/۳۱	۱/۳۶	۱/۶۲
۱۰	۸۶۰	۱۰۰۰	۲۲۰۰	۲۳/۶	۲۲/۹	۲۷/۹	۱/۲۳	۱/۲۷	۱/۵۰
۲۰	۷۷۰	۹۷۰	۲۱۵۰	۲۲/۶	۲۲/۰	۲۷/۰	۱/۲۲	۱/۲۲	۱/۴۵
۳۰	۶۸۰	۸۹۰	۱۹۷۰	۲۱/۶	۲۱/۱	۲۶/۱	۱/۱۹	۱/۱۸	۱/۴۱

نتایج جدول ۴ نشان می‌دهد که هزینه آب‌بها یکی از عوامل بسیار اثرگذار بر شاخص‌های اقتصادی زراعت چوب است و با افزایش آن، هر سه شاخص ارزش خالص فعلی، نرخ بازده داخلی و نسبت سود به هزینه در تمامی گونه‌ها روندی کاهشی و منظم دارند. با کاهش ۳۰ درصدی آب‌بها، بیشترین مقادیر اقتصادی مشاهده می‌شود؛ به‌طوری‌که ارزش خالص فعلی در این حالت به ۱۳۵۰، ۱۷۸۰ و ۳۰۰۰ میلیون تومان به‌ترتیب برای سنوبر، اکالیپتوس و پالونیا می‌رسد، در حالی‌که با افزایش ۳۰ درصدی هزینه آب، این مقادیر به‌طور محسوسی کاهش می‌یابد. بیشترین حساسیت به تغییر قیمت آب مربوط به اکالیپتوس است (شکل ۶)، به‌گونه‌ای که نرخ بازده داخلی آن از ۲۹/۴ درصد در سناریوی کاهش هزینه به ۱۷/۴ درصد در سناریوی افزایش هزینه می‌رسد و نسبت سود به هزینه آن تا مرز ۱/۰۶ کاهش می‌یابد که نشان‌دهنده کاهش شدید حاشیه سود و وابستگی بالای این گونه به هزینه‌های آبیاری (به دلیل نیاز آبی بالا) است. در مقابل، پالونیا در تمامی سناریوها بالاترین مقادیر ارزش خالص فعلی، نرخ بازده داخلی و نسبت سود به هزینه را حفظ کرده و کمترین افت را نشان می‌دهد، که بیانگر کارایی بالاتر در مصرف آب و پایداری اقتصادی بیشتر آن در شرایط افزایش قیمت نهاده‌های آبی است. سنوبر نیز واکنشی میانه داشته و کاهش شاخص‌های اقتصادی در آن قابل توجه ولی کمتر از اکالیپتوس است. در مجموع، نتایج این تحلیل حساسیت نشان می‌دهد که افزایش هزینه آب می‌تواند سودآوری طرح را به‌طور جدی تحت تأثیر قرار دهد، اما انتخاب گونه‌های با بهره‌وری بالاتر آب، به‌ویژه پالونیا، نقش تعیین‌کننده‌ای در حفظ توجیه‌پذیری اقتصادی پروژه خواهد داشت.

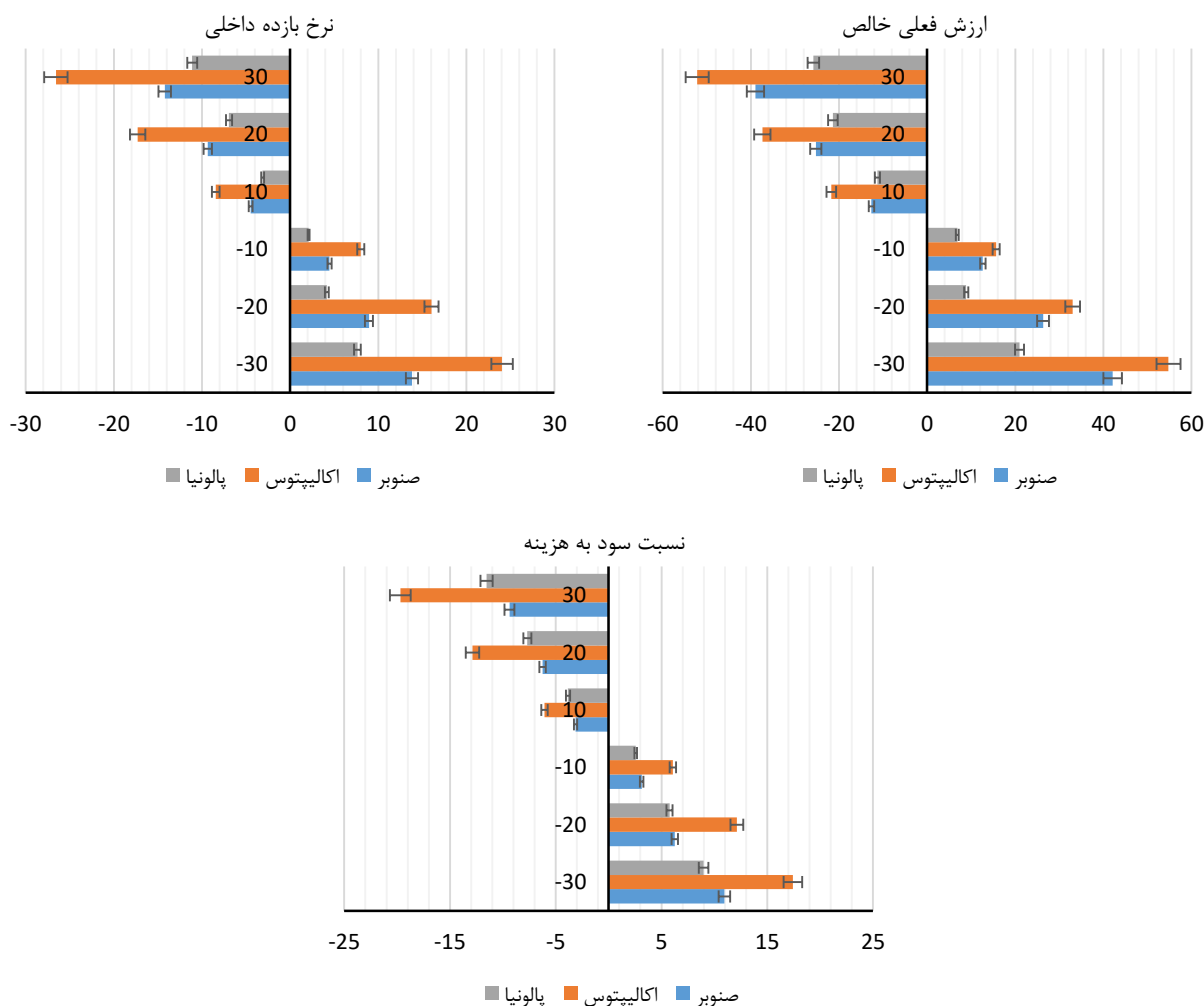
تحلیل جدول (۵) نشان می‌دهد که تغییر هزینه نهال تأثیر مستقیم و منظم بر شاخص‌های اقتصادی طرح‌های کشت سه گونه سنوبر، اکالیپتوس و پالونیا دارد. با افزایش هزینه نهال از منفی ۳۰ درصد تا مثبت ۳۰ درصد، ارزش خالص فعلی، نرخ بازده داخلی و نسبت سود به هزینه همگی به‌صورت یکنواخت کاهش می‌یابند؛ این رفتار کاملاً منطقی است، زیرا افزایش هزینه سرمایه‌گذاری اولیه سبب کاهش درآمد خالص و افت کارایی اقتصادی می‌شود. در بررسی ارزش خالص فعلی مشخص است که پالونیا بالاترین ارزش فعلی خالص را داراست و در سطح منفی ۳۰ درصد هزینه نهال به ۳۲۵۰ میلیون تومان می‌رسد، درحالی‌که در مثبت ۳۰ درصد به ۱۳۲۰ میلیون تومان افت می‌کند. این تفاوت قابل توجه نشان‌دهنده حساسیت شدید پالونیا به تغییر قیمت نهال‌هاست، اگرچه همچنان از نظر سودآوری مطلق برتر از دو گونه دیگر باقی می‌ماند. نرخ بازده داخلی نیز همان الگوی نزولی را نشان می‌دهد؛ سنوبر از ۲۷ درصد به ۲۲/۴ درصد، اکالیپتوس از ۲۶/۵ درصد به ۲۰/۵ درصد، و پالونیا از ۳۴/۲ درصد به ۲۳ درصد کاهش می‌یابد. این روند بیانگر کاهش کارایی سرمایه‌گذاری با افزایش هزینه اولیه است و باز هم پالونیا در تمام سطوح بازده بالاتری را نسبت به بقیه حفظ می‌کند، هرچند افت آن نسبتاً تندتر است. نسبت سود به هزینه نیز در هر سه گونه روند نزولی مشابهی دارد و در محدوده منفی ۳۰ درصد تا مثبت ۳۰ درصد از حدود ۱/۸۵ به ۱/۲۶ در پالونیا و از حدود ۱/۳۶ به ۱/۲۰ در سنوبر کاهش می‌یابد. شاخص‌های همگی بالاتر از ۱ باقی می‌مانند، که نشان می‌دهد حتی در سناریوی افزایش ۳۰ درصدی هزینه نهال، طرح‌ها همچنان از نظر اقتصادی سودآورند.

در مقایسه بین گونه‌ها، پالونیا از نظر سه شاخص اصلی بهترین عملکرد را دارد؛ بیشترین ارزش خالص فعلی، بالاترین نرخ بازده داخلی، و نسبت سود به هزینه بزرگ‌تر متعلق به این گونه است. با این حال، به دلیل شیب تند افت شاخص‌ها، پالونیا حساس‌ترین گونه نسبت به تغییرات قیمت نهال است و کنترل هزینه اولیه در کشت آن اهمیت فراوان دارد (شکل ۷). سنوبر و اکالیپتوس پایداری اقتصادی بیشتری نشان می‌دهند، زیرا کاهش شاخص‌های آنها با تغییر هزینه‌ها ملایم‌تر است، هرچند بازده کلی پایین‌تری دارند.



جدول ۴. تاثیر تغییر هزینه آب بهاء بر ارزش خالص فعلی، نرخ بازده داخلی و نسبت سود به هزینه

نسبت	ارزش خالص فعلی (میلیون تومان)			نرخ بازده داخلی (درصد)			نسبت سود به هزینه (بدون بعد)		
	پالونیا	اکالیپتوس	صنوبر	پالونیا	اکالیپتوس	صنوبر	پالونیا	اکالیپتوس	صنوبر
-۳۰	۳۰۰۰	۱۷۸۰	۱۳۵۰	۳۱/۰	۲۹/۴	۲۸/۰	۱/۷۰	۱/۵۵	۱/۴۲
-۲۰	۲۷۰۰	۱۵۳۰	۱۲۰۰	۳۰/۰	۲۷/۵	۲۶/۸	۱/۶۵	۱/۴۸	۱/۳۶
-۱۰	۲۶۵۰	۱۳۳۰	۱۰۷۰	۲۹/۴	۲۵/۶	۲۵/۷	۱/۶۰	۱/۴۰	۱/۳۲
۱۰	۲۲۰۰	۹۷۰	۸۳۰	۲۷/۹	۲۱/۷	۲۳/۵	۱/۵۰	۱/۲۴	۱/۲۴
۲۰	۱۹۵۰	۷۸۰	۷۱۰	۲۶/۸	۱۹/۶	۲۲/۳	۱/۴۴	۱/۱۵	۱/۲۰
۳۰	۱۸۴۰	۵۵۰	۵۸۰	۲۵/۶	۱۷/۴	۲۱/۱	۱/۳۳	۱/۰۶	۱/۱۶



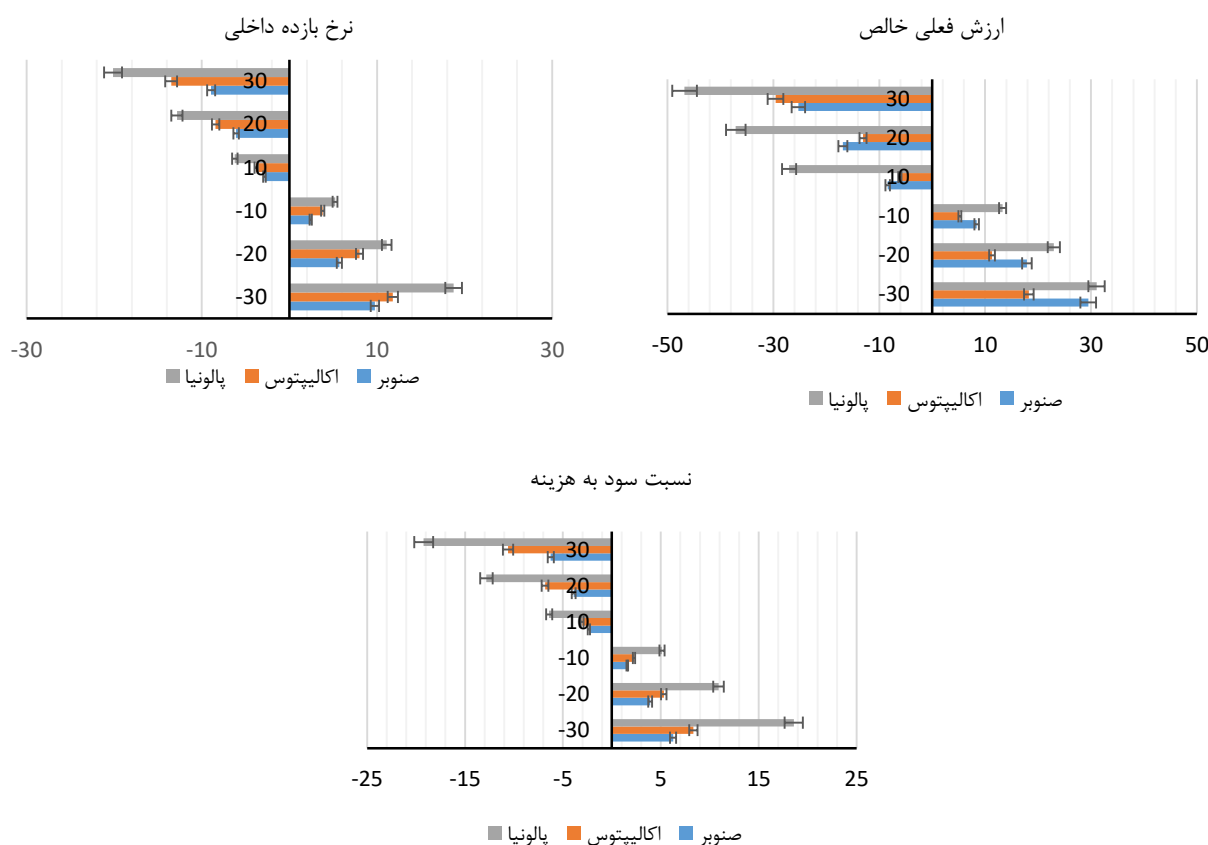
شکل ۶. درصد تغییر ارزش فعلی خالص، نرخ بازده داخلی و نسبت سود به هزینه در آراء افزایش و کاهش ۱۰، ۲۰، ۳۰ درصد هزینه آب بها پساب تصفیه شده در مقایسه با شرایط فعلی

در تحلیل کلی، رابطه میان تغییر هزینه نهال و شاخص‌های اقتصادی در هر سه گونه منفی و تقریباً خطی است؛ یعنی با هر درصد افزایش در هزینه نهال، ارزش فعلی خالص، نرخ بازده داخلی و نسبت منفعت به هزینه نسبتاً به اندازه‌ای مشخص کاهش می‌یابند. این رفتار از نظر تئوری مالی کاملاً سازگار با معادلات جریان نقدی و منحنی‌های بازده سرمایه‌گذاری است. بنابراین می‌توان گفت که افزایش هزینه نهال عملاً عاملی بازدارنده در کارایی اقتصادی طرح‌های کشت محسوب می‌شود، ولی شدت تأثیر آن در گونه‌های مختلف متفاوت است. پالونیا اقتصادی‌ترین و در عین حال حساس‌ترین گزینه، صنوبر گزینه‌ای متعادل و کم‌ریسک، و اکالیپتوس حد وسط این دو است. در نتیجه اگر هدف حداکثر سود در کوتاه‌مدت باشد، پالونیا انتخاب برتر است اما باید برای کاهش ریسک افزایش هزینه نهال، سازوکار تأمین

مناسب نهال‌های ارزان و استاندارد طراحی شود؛ و اگر هدف پایداری و ریسک پایین‌تر باشد، صنوبر و سپس اکالیپتوس گزینه‌های منطقی‌تر به شمار می‌روند.

جدول ۵. تاثیر تغییر هزینه نهال بر ارزش خالص فعلی، نرخ بازده داخلی و نسبت سود به هزینه

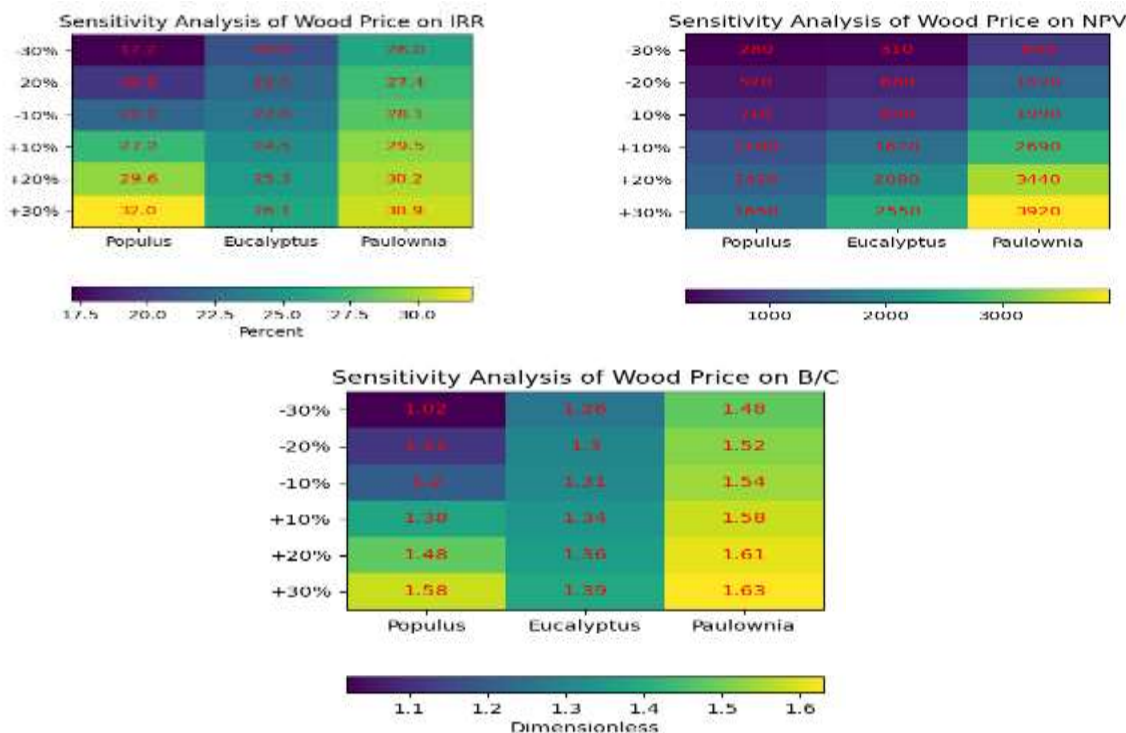
تغییر هزینه نهال (درصد)	ارزش خالص فعلی (میلیون تومان)			نرخ بازده داخلی (درصد)			نسبت سود به هزینه (بدون بعد)		
	صنوبر	اکالیپتوس	پالونیا	صنوبر	اکالیپتوس	پالونیا	صنوبر	اکالیپتوس	پالونیا
-۳۰	۱۲۳۰	۱۳۶۰	۳۲۵۰	۲۷/۰	۲۶/۵	۳۴/۲	۱/۳۶	۱/۴۳	۱/۸۵
-۲۰	۱۱۲۰	۱۲۸۰	۳۰۵۰	۲۶/۰	۲۵/۶	۳۲/۰	۱/۳۳	۱/۳۹	۱/۷۳
-۱۰	۱۰۳۰	۱۲۱۰	۲۸۱۰	۲۵/۲	۲۴/۶	۳۰/۳	۱/۳۰	۱/۳۵	۱/۶۴
۱۰	۸۷۰	۱۰۸۰	۱۸۱۰	۲۳/۹	۲۲/۸	۲۷/۰	۱/۲۵	۱/۲۸	۱/۴۶
۲۰	۷۹۰	۱۰۰۰	۱۵۶۰	۲۳/۱	۲۱/۷	۲۵/۱	۱/۲۳	۱/۲۳	۱/۳۶
۳۰	۷۱۰	۸۱۰	۱۳۲۰	۲۲/۴	۲۰/۵	۲۳/۰	۱/۲۰	۱/۱۹	۱/۲۶



شکل ۷. درصد تغییر ارزش فعلی خالص، نرخ بازده داخلی و نسبت سود به هزینه در ازاء افزایش و کاهش ۱۰، ۲۰، ۳۰ درصد هزینه نهال در مقایسه با شرایط فعلی

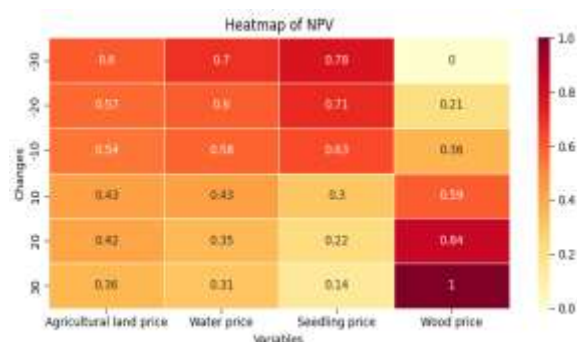
نتایج به‌وضوح نشان می‌دهد که قیمت فروش چوب، اثرگذارترین متغیر بر عملکرد اقتصادی طرح‌های زراعت چوب است و تغییرات آن موجب نوسانات شدید در هر سه شاخص اقتصادی می‌شود. با افزایش قیمت چوب از ۳۰- به ۳۰+ درصد، ارزش خالص فعلی، نرخ بازده داخلی و نسبت سود به هزینه در تمامی گونه‌ها روندی صعودی و کاملاً معنی‌دار دارند؛ به‌طوری‌که ارزش خالص فعلی در صنوبر از ۲۸۰ به ۱۶۵۰، در اکالیپتوس از ۳۱۰ به ۲۵۵۰ و در پالونیا از ۸۹۰ به ۳۹۲۰ میلیون تومان افزایش می‌یابد که نشان‌دهنده نقش غالب درآمد حاصل از فروش محصول در تعیین سودآوری نهایی است (شکل ۸). در سناریوی کاهش ۳۰ درصدی قیمت چوب، شاخص نسبت سود به هزینه در صنوبر به ۱/۰۲ نزدیک می‌شود که بیانگر شکنندگی اقتصادی این گونه در برابر افت قیمت بازار است، در حالی‌که اکالیپتوس و به‌ویژه

پالونیا همچنان حاشیه سود مطمئن تری را حفظ می‌کند. همچنین دامنه تغییرات نرخ بازده داخلی نشان می‌دهد که افزایش قیمت چوب می‌تواند بازده سرمایه‌گذاری را به‌طور قابل‌توجهی بهبود دهد (افزایش نرخ بازده داخلی صنوبر از ۱۷/۲ به ۳۲ درصد)، که این موضوع حساسیت بالای سودآوری به شرایط بازار را تأیید می‌کند. در مجموع، این تحلیل بیانگر آن است که پایداری اقتصادی زراعت چوب بیش از هر عامل هزینه‌ای، تابع قیمت فروش چوب است و گونه‌های با تولید بیشتر و ارزش افزوده بالاتر، به‌ویژه پالونیا، توانایی بیشتری در بهره‌گیری از رونق بازار و کاهش ریسک ناشی از افت قیمت دارند.



شکل ۸. نقشه حرارتی اثر تغییر قیمت چوب بر ارزش خالص فعلی، نرخ بازده داخلی و نسبت سود به هزینه

در جمع‌بندی تحلیل حساسیت شاخص‌های اقتصادی زراعت چوب مشخص شد که نوسانات قیمت چوب بیشترین نقش را در تغییرپذیری خروجی‌های اقتصادی طرح دارد و اثر آن به‌طور معناداری فراتر از متغیرهای هزینه‌ای مانند قیمت زمین، هزینه آب آبیاری و قیمت نهال است. این نتیجه با یافته‌های Zhang و همکاران (۲۰۱۹)، Cuong و همکاران (۲۰۲۰) و Silva و همکاران (۲۰۲۰) همخوانی دارد که نوسانات بازار چوب را مهم‌ترین عامل مؤثر بر ارزش خالص فعلی و نرخ بازده داخلی در پروژه‌های زراعت چوب معرفی کرده‌اند. بر اساس داده‌های اقتصادی کشت پالونیا، دامنه تغییر ارزش خالص فعلی در سناریوی نوسان $\pm 30\%$ درصدی قیمت چوب حدود ۳۰۳۰ میلیون تومان برآورد شد، در حالی که این دامنه برای قیمت زمین حدود ۷۵۰ میلیون تومان، برای هزینه آب نزدیک ۱۱۶۰ میلیون تومان و برای هزینه نهال حدود ۱۹۳۰ میلیون تومان بود. این اختلاف بیانگر آن است که توان سودآوری طرح در درجه نخست به سازوکارهای تولید درآمد وابسته است؛ یعنی قیمت و حجم قابل فروش چوب سهم اصلی را در شکل‌گیری بازده اقتصادی دارند و کاهش یا افزایش هزینه‌های ورودی عمدتاً نقش تقویت یا تضعیف حاشیه‌ای ایفا می‌کند (شکل ۹) که این الگو با یافته‌های گزارش‌شده در جنوب چین نیز مطابقت دارد (Cubbage et al., 2019).



شکل ۹. نقشه حرارتی ارزش فعلی خالص پالونیا در اثر افزایش و کاهش هزینه زمین، هزینه آب بهاء، هزینه نهال و قیمت چوب

از منظر نرخ بازده داخلی نیز قیمت چوب بیشترین نوسان را ایجاد کرد؛ به گونه‌ای که تغییر قیمت در دامنه $\pm 30\%$ درصد موجب تغییر حدود $15/2\%$ درصدی در نرخ بازده داخلی شد، در حالی که تغییر در قیمت زمین، هزینه آب و قیمت نهال به ترتیب موجب تغییر حدود $5/1\%$ ، $5/4\%$ و $11/3\%$ درصدی در این شاخص گردید (شکل ۱۰). این یافته‌ها تأیید می‌کند که بازده سرمایه‌گذاری در زراعت چوب تابع مستقیم ظرفیت درآمدزایی است و هرگونه نوسان در قیمت بازار چوب توان تعدیل‌گری مؤثری بر جذب یا گریز سرمایه دارد (Holopainen et al., 2010).



شکل ۱۰. نقشه حرارتی نرخ بازده داخلی پالونیا در اثر افزایش و کاهش هزینه زمین، هزینه آب بهاء، هزینه نهال و قیمت چوب

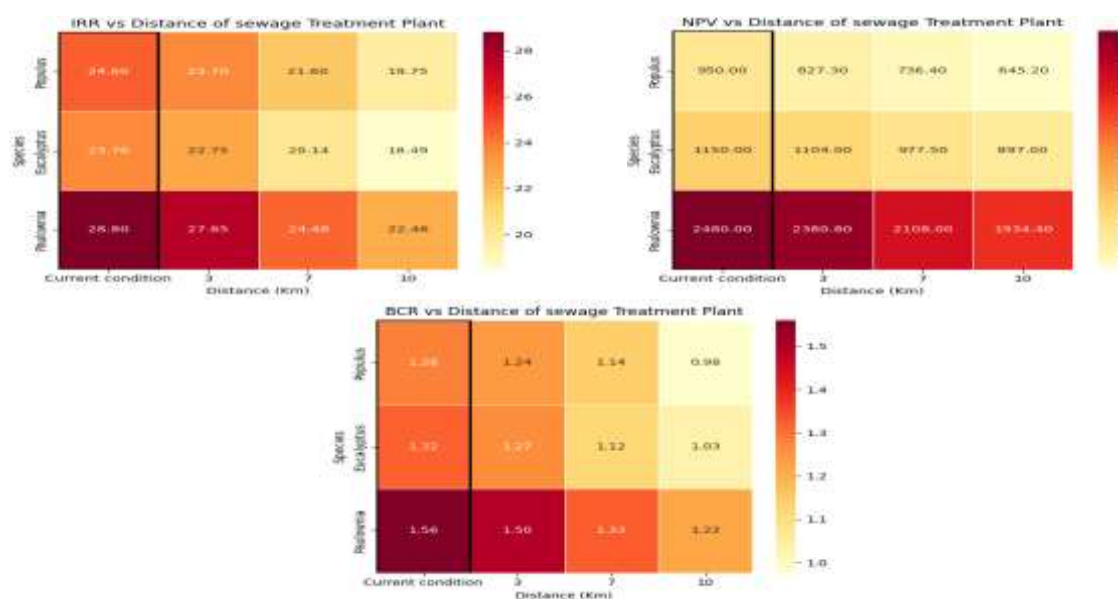
در خصوص نسبت سود به هزینه، الگوی مشابهی مشاهده شد؛ به طوری که دامنه تغییر ناشی از نوسان قیمت چوب حدود $1/0$ واحد برآورد شد، در حالی که دامنه تغییر برای قیمت زمین $0/33$ واحد، برای هزینه آب $0/36$ واحد و برای هزینه نهال $0/66$ واحد بود. این الگو نشان می‌دهد که کارایی اقتصادی طرح‌های زراعت چوب بیشتر از طریق افزایش درآمد و ارزش افزوده قابل ارتقا است تا صرفاً از طریق کاهش هزینه‌ها (شکل ۱۱)؛ یافته‌ای که با نتایج کیف و همکاران (۲۰۱۳) درباره برتری رویکردهای مبتنی بر بهبود ارزش چوب در مقابل سیاست‌های صرفاً کاهش هزینه همخوانی دارد.



شکل ۱۱. نقشه حرارتی نسبت سود به هزینه پالونیا در اثر افزایش و کاهش هزینه زمین، هزینه آب بهاء، هزینه نهال و قیمت چوب

نتایج محاسبه شاخص‌های اقتصادی برای سه گونه در مزرعه دو هکتاری، با در نظر گرفتن سه سناریوی فاصله‌ای ۳، ۷ و ۱۰ کیلومتری از تصفیه‌خانه و افزایش متناسب هزینه انتقال پساب، نشان می‌دهد که افزایش فاصله، به دلیل رشد هزینه‌های سالانه انتقال و پمپاژ، به طور

تجمعی ارزش فعلی درآمدها را کاهش می‌دهد و در نتیجه ارزش خالص فعلی، نرخ بازده داخلی و نسبت سود به هزینه در هر سه گونه افت می‌کند (شکل ۱۲). با این حال، شدت این افت در گونه‌ها یکسان نیست. پالونیا به دلیل حاشیه اقتصادی مناسب‌تر و جریان نقدی زودبازده، کمترین میزان کاهش را تجربه می‌کند و حتی در فاصله ۱۰ کیلومتری نیز نسبت سود به هزینه آن بالاتر از حد اقتصادی باقی می‌ماند (۱/۲۲)؛ موضوعی که نشان می‌دهد پالونیا از نظر اقتصادی توان تحمل هزینه‌های اضافی را بهتر دارد. در اکالیپتوس با افزایش فاصله، وضعیت اقتصادی به تدریج تضعیف می‌شود و در سناریوی ۱۰ کیلومتری تنها اندکی اقتصادی باقی می‌ماند (نسبت سود به هزینه برابر ۱/۰۳)؛ بنابراین این گونه در فواصل زیاد نیازمند دقت بیشتری در تصمیم‌گیری سرمایه‌گذاری است. در مقابل، صنوبر به دلیل دوره بهره‌برداری طولانی‌تر و بازگشت نقدی دیر هنگام، بیشترین حساسیت را نسبت به افزایش هزینه انتقال نشان می‌دهد و در فاصله ۱۰ کیلومتری عملاً توجیه اقتصادی پایدار ندارد (نسبت سود به هزینه برابر ۰/۹۸). در مجموع، این نتایج بیان می‌کند که دامنه فاصله انتقال آب بر انتخاب گونه تأثیر مستقیم دارد و در فواصل طولانی، پالونیا و در مرتبه بعد اکالیپتوس گزینه‌های مناسب‌تری هستند؛ در حالی که صنوبر تنها در صورت وجود حمایت‌های هزینه‌ای یا کاهش هزینه زیرساخت انتقال قابل توصیه است.



شکل ۱۲. نقشه حرارتی اثر فاصله تصفیه‌خانه تا زمین زراعی بر ارزش خالص فعلی، نرخ بازده داخلی و نسبت سود به هزینه سه گونه صنوبر، اکالیپتوس و پالونیا

تحلیل زیرشاخص‌های محیط‌زیستی نشان می‌دهد که سه گونه مورد بررسی از نظر میزان سازگاری با شرایط استفاده از پساب تصفیه‌شده و الزامات پایداری محیط‌زیست، الگوی عملکردی متفاوتی دارند (جدول ۶). صنوبر با کسب امتیاز خام ۲۱ از ۲۵، بالاترین سطح انطباق محیط‌زیستی را نشان داد. این برتری عمدتاً ناشی از ریسک اکولوژیک بسیار پایین (امتیاز ۵)، سازگاری کامل با سیاست‌های حفاظتی و محدودیت‌های قانونی (امتیاز ۵)، و اثرات قابل کنترل بر ویژگی‌های خاک (امتیاز ۴) است. همچنین نیاز آبی نسبتاً متعادل این گونه موجب می‌شود فشار کمتری بر منابع آب وارد شود و استفاده از پساب با مخاطره کمتری همراه باشد. بر این اساس، شاخص نهایی پایداری محیط‌زیستی برای صنوبر (۸/۴) در محدوده پایداری مطلوب قرار می‌گیرد و بیانگر گزینه‌ای کم‌ریسک و سازگار با مدیریت پایدار منابع آب و خاک است. اکالیپتوس با امتیاز خام ۱۶، وضعیت میانی را به خود اختصاص داد. اگرچه این گونه در تحمل شوری و کیفیت پساب عملکرد مناسبی دارد (امتیاز ۴)، اما نیاز آبی بالا (امتیاز ۲) و اثرات بالقوه آن بر منابع آب و خاک موجب کاهش امتیاز کلی شده است. همچنین ریسک اکولوژیک و ملاحظات مدیریتی آن در سطح متوسط ارزیابی گردید. شاخص نهایی پایداری محیط‌زیستی اکالیپتوس (۶/۴) نشان‌دهنده پایداری متوسط است؛ به این معنا که کشت آن مستلزم اعمال مدیریت دقیق آبیاری، پایش کیفیت پساب و کنترل سطح زیرکشت است تا از بروز پیامدهای محیط‌زیستی جلوگیری شود. پالونیا با امتیاز خام ۱۱ کمترین میزان سازگاری محیط‌زیستی را نشان داد. پایین بودن امتیاز در شاخص‌های سازگاری با سیاست‌های حفاظتی (امتیاز ۱)، ریسک اکولوژیک و تهاجمی بودن (امتیاز ۲)، و تحمل محدود به شرایط کیفی پساب، از عوامل اصلی کاهش امتیاز این گونه است. با وجود نیاز آبی متوسط، حساسیت بالا به مدیریت و نگرانی‌های قانونی و اکولوژیک سبب شده شاخص نهایی پایداری محیط‌زیستی آن (۴/۴) در مرز پایین طبقه پایداری متوسط قرار گیرد.

جدول ۶. شاخص پایداری محیط‌زیستی در سه گونه صنوبر، اکالیپتوس و پالونیا

نام گونه			بعد محیط‌زیستی
پالونیا	اکالیپتوس	صنوبر	
۳	۲	۴	نیاز آبی سالانه
۲	۴	۳	تحمل شوری و کیفیت پساب
۳	۳	۴	اثر بر خاک (شوری، سدیمی‌شدن، نفوذپذیری)
۲	۳	۵	ریسک اکولوژیک و تهاجمی بودن
۱	۴	۵	سازگاری با سیاست‌های حفاظتی و محدودیت‌های قانونی
۱۱	۱۶	۲۱	جمع امتیاز
۴/۴	۶/۴	۸/۴	شاخص پایداری محیط‌زیستی (ESI)

در مجموع، مقایسه امتیازها نشان می‌دهد که از منظر محیط‌زیستی، صنوبر پایدارترین گونه، اکالیپتوس گزینه‌ای با پایداری مشروط به مدیریت، و پالونیا گونه‌ای با ریسک بالاتر و نیازمند محدودیت‌های اجرایی است. این نتایج تأکید می‌کند که در برنامه‌ریزی زراعت چوب با استفاده از منابع آب نامتعارف، شاخص‌های اکولوژیک و الزامات حفاظتی باید هم‌تراز با معیارهای اقتصادی در تصمیم‌گیری لحاظ شوند.

نتیجه‌گیری و پیشنهادات

بررسی اقتصادی سه گونه پالونیا، اکالیپتوس و صنوبر در منطقه ماهدشت کرج نشان داد که تفاوت عملکرد اقتصادی آن‌ها عمدتاً ناشی از اختلاف در بهره‌وری تولید چوب، هزینه‌های استقرار و نگهداری و کارایی استفاده از نهاده‌ها است، نه طول دوره بهره‌برداری. پالونیا به دلیل تولید بیشتر چوب و ارزش اقتصادی بالاتر در واحد سطح، بیشترین سودآوری و پایداری اقتصادی را حتی در سناریوهای افزایش هزینه زمین، آب و نهال حفظ کرد. اکالیپتوس نیز از نظر اقتصادی عملکرد مناسبی داشت، اما وابستگی بیشتری به هزینه و مدیریت منابع آب نشان داد. در مقابل، صنوبر به دلیل بهره‌وری اقتصادی کمتر و حساسیت بالاتر به افزایش هزینه‌های زمین و زیرساخت، کاهش بیشتری در شاخص‌های اقتصادی تجربه کرد. همچنین افزایش فاصله مزرعه از تصفیه‌خانه، از طریق افزایش هزینه‌های انتقال، انرژی و پمپاژ، سودآوری هر سه گونه را کاهش داد؛ با این حال پالونیا همچنان از آستانه اقتصادی فراتر باقی ماند، در حالی که صنوبر در فواصل طولانی به مرز عدم توجیه اقتصادی نزدیک شد. در میان عوامل اقتصادی، قیمت فروش چوب بیشترین تأثیر را بر NPV، IRR و BCR داشت که اهمیت توسعه بازار، تثبیت قیمت و تقویت زنجیره ارزش چوب را در کاهش ریسک سرمایه‌گذاری نشان می‌دهد. علاوه بر این، در صورت تغییر کاربری اراضی پس از پایان دوره زراعت چوب به محصولات زراعی حساس، ممکن است بسته به وضعیت شوری و سدیمی‌شدن خاک، اجرای عملیات اصلاحی نظیر آبشویی و مصرف گچ کشاورزی ضروری باشد؛ از این رو، پیشنهاد می‌شود هزینه‌های احتمالی احیای خاک و ارزش باقیمانده زمین در مطالعات اقتصادی بلندمدت به‌صورت یک سناریوی مستقل لحاظ شوند.

ارزیابی محیط‌زیستی نشان داد که صنوبر با کسب بالاترین امتیاز، به دلیل ریسک اکولوژیک پایین، سازگاری بیشتر با شرایط اقلیمی، نیاز آبی متعادل و انطباق کامل با سیاست‌های حفاظتی، پایدارترین گزینه محسوب می‌شود. اکالیپتوس با وجود تحمل مناسب شوری، به دلیل نیاز آبی بیشتر در رتبه بعدی قرار گرفت، در حالی که پالونیا به علت محدودیت‌های مدیریتی، ریسک اکولوژیک و ملاحظات قانونی، کمترین امتیاز زیست‌محیطی را کسب کرد. در مجموع، نتایج نشان داد که انتخاب گونه نباید صرفاً بر پایه بیشینه‌سازی سود اقتصادی انجام شود، بلکه لازم است شاخص‌های اقتصادی، پایداری زیست‌محیطی و قابلیت اجرایی به‌صورت تلفیقی مورد توجه قرار گیرند. بر این اساس، پالونیا گزینه‌ای مناسب برای سرمایه‌گذاری اقتصادی در اراضی دارای دسترسی مطمئن به پساب، اکالیپتوس گزینه‌ای با نیاز به مدیریت دقیق منابع آب، و صنوبر مناسب‌ترین گونه برای برنامه‌های توسعه مبتنی بر مدیریت پایدار منابع طبیعی است. در این راستا، توسعه قراردادهای بلندمدت تأمین پساب، خرید تضمینی چوب، حمایت‌های مالی و تخصیص اراضی مناسب می‌تواند ضمن کاهش ریسک سرمایه‌گذاری، زمینه گسترش پایدار زراعت چوب را در مناطق دارای منابع آب نامتعارف فراهم کند.

ملاحظات اخلاقی

حامی مالی

این پژوهش هیچ‌گونه حمایت مالی از سوی سازمان‌ها، مؤسسات، دانشگاه‌ها یا سایر نهادهای دولتی و غیردولتی دریافت نکرده است.



مشارکت نویسندگان

تمامی نویسندگان در تمامی مراحل این پژوهش، شامل ایده‌پردازی، طراحی مطالعه، جمع‌آوری داده‌ها، تحلیل و تفسیر نتایج، نگارش، بازبینی و تأیید نهایی مقاله، به‌طور یکسان مشارکت داشته‌اند و مسئولیت صحت و یکپارچگی محتوای مقاله را مشترکاً بر عهده دارند.

اعلامیه هوش مصنوعی مولد و فناوری‌های مبتنی بر هوش مصنوعی در فرایند نگارش

نویسندگان اعلام می‌کنند که در تمامی مراحل تهیه این مقاله، شامل ایده‌پردازی، طراحی پژوهش، تحلیل و تفسیر داده‌ها، نگارش، ویرایش و بازنگری متن، از هیچ‌گونه ابزار یا سامانه مبتنی بر هوش مصنوعی مولد استفاده نشده است. تمامی محتوای علمی، تحلیل‌ها و نگارش مقاله حاصل فعالیت و مسئولیت مستقیم نویسندگان بوده و نویسندگان مسئولیت کامل صحت، اصالت و یکپارچگی محتوای ارائه شده را بر عهده دارند.

بیانیه دسترسی به داده‌ها

داده‌های مورد استفاده و/یا تولیدشده در این پژوهش، شامل داده‌های خام، داده‌های پردازش‌شده، کدهای تحلیلی و سایر مستندات مرتبط، در مخازن عمومی منتشر نشده‌اند؛ با این وجود، این داده‌ها در صورت ارائه درخواست علمی موجه و با تأیید نویسنده مسئول، از طریق مکاتبه با وی قابل دسترسی خواهند بود.

سیاسگزاری

نویسندگان مراتب سپاس و قدردانی صمیمانه خود را از داوران محترم به‌دلیل ارزیابی دقیق، نقدهای سازنده و پیشنهادهای ارزشمند ابراز می‌کنند. دیدگاه‌های تخصصی ایشان نقش مؤثری در ارتقای کیفیت علمی، افزایش دقت، بهبود ساختار و غنای محتوای مقاله حاضر داشته است.

پیروی از اصول اخلاق پژوهش

با توجه به اینکه این پژوهش صرفاً مبتنی بر تحلیل داده‌ها و ارزیابی‌های اقتصادی بوده و هیچ‌گونه مداخله‌ای بر روی انسان، حیوانات یا نمونه‌های زیستی در آن انجام نشده است، اخذ تأییدیه از کمیته اخلاق در پژوهش برای این مطالعه الزامی نبوده است.

تعارض منافع

نویسندگان اعلام می‌کنند که هیچ‌گونه تعارض منافع مالی، حرفه‌ای، شخصی یا سازمانی در ارتباط با این پژوهش وجود ندارد و هیچ عاملی بر طراحی، اجرای پژوهش، تحلیل داده‌ها، تفسیر نتایج یا انتشار این مقاله تأثیرگذار نبوده است.

منابع

- ابراهیمیان، حامد؛ لیاقت، عبدالمجید؛ موسوی، سید مجید؛ پاشاپور، سالار؛ صالح، محمد؛ صالحی، مبین؛ خانکی، شایان و اشرفی، علی. (۱۴۰۳). گزارش نهایی: اثرات بلندمدت آبیاری با پساب تصفیه‌شده بر خاک اراضی باغی و زراعی دشت‌های هشتگرد و ماهدشت (گزارش پژوهشی). کرج: مؤسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، پژوهشکده محیط‌زیست آب و خاک.
- شادمانی، علیرضا و صالح، ایرج. (۱۳۸۶). بررسی روش‌های مورد استفاده در ارزیابی مالی و اقتصادی طرح‌های سرمایه‌گذاری در بخش کشاورزی ایران. در مجموعه مقالات ششمین همایش اقتصاد کشاورزی ایران. مشهد: دانشگاه فردوسی مشهد.
- شهبازی، علی؛ خلیقی سیگارودی، شهرام؛ ملکیان، آرش و سلاجقه، علی. (۱۳۹۶). تحلیل حساسیت پارامترهای ورودی مدل SWMM در مدیریت رواناب شهری (مطالعه موردی: شهر ماهدشت). پژوهش‌های آبخیزداری، ۳۰ (۱)، ۶۷-۷۵.
- وحیدی، زهرا و صالح‌نیا، مینا. (۱۴۰۲). ارزیابی اقتصادی طرح‌های توسعه زراعت چوب در ایران. اقتصاد کشاورزی و توسعه، ۳۱ (۲)، ۱۸۵-۲۰۸.
- محمدی، زهره؛ محمدی لیمایی، سلیمان و رستمی شهرجی، تیمور. (۱۳۹۸). ارزیابی مناسب‌ترین گونه‌های درختی با استفاده از ارزش انتظاری زمین: مطالعه موردی جنگل کاری در شمال ایران. مجله آسیایی ترویج کشاورزی، اقتصاد و جامعه‌شناسی، ۳۱ (۴)، ۱-۸.
- توکل‌نکو، حسین و پورمیدانی، عباس. (۱۴۰۰). زراعت چوب اکالیپتوس در مناطق مرکزی ایران. تهران: مؤسسه تحقیقات جنگل‌ها و مراتع کشور.
- دانه‌کار، افشین و محمودی، بیت‌اله. (۱۳۹۱). اصول جنگل کاری. تهران: سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی (AREEO)، مؤسسه آموزش و ترویج کشاورزی.
- گوشه‌گیر، سیده زهرا؛ فقهی، جهانگیر و اینس، جان ال. (۱۴۰۱). چالش‌های پیش روی بهبود مدیریت جنگل در جنگل‌های هیرکانی ایران. جنگل‌ها، ۱۳ (۱۲)، ۲۱۸۰.

مدیررحمتی، علیرضا. (۱۳۹۵). توسعه زراعت چوب؛ ضرورتی اجتناب‌ناپذیر و حیاتی برای ایران. طبیعت ایران، ۱ (۱)، ۲۱-۱۴.

REFERENCES

- Ayers, R. S., & Westcot, D. W. (1985). *Water quality for agriculture* (FAO Irrigation and Drainage Paper No. 29, Rev. 1). Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Buncle, A., Daigneault, A., Holland, P., Fink, A., Hook, S., & Manley, M. (2013). *Cost-benefit analysis for natural resource management in the Pacific: A guide*. SPREP, SPC, PIFS, Landcare Research, & Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ).
- Cha-Um, S., & Kirdmanee, C. (2008). Assessment of salt tolerance in Eucalyptus, rain tree and Thai neem under laboratory and field conditions. *Pakistan Journal of Botany*, 40(5), 2041–2051.
- Chen, S. (2024). Net present value (NPV) sensitivity analysis: Understanding risk in investment projects. *Advances in Economics, Management and Political Sciences*, 150(1), 186–194.
- Cuong, T., Chinh, T. T. Q., Zhang, Y., & Xie, Y. (2020). Economic performance of forest plantations in Vietnam: Eucalyptus, Acacia mangium, and Manglietia conifera. *Forests*, 11(3), 284.
- Danekar, A. and Mahmoodi, B. (2012). Principles of afforestation. Tehran: Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Agricultural Education and Extension Institute. (In Persian).
- de Oliveira Silva, L., Mendonça, H. V., Conforto, B. A. A. F., Pinto, M. F., & Carvalho, D. F. (2022). Production of forest seedlings using sewage sludge and automated irrigation with ozonated cattle wastewater. *PLOS ONE*, 17(10), e0276633.
- Ebrahimian, H., Liaghat, A., Mousavi, S. M., Pashapour, S., Saleh, M., Salehi, M., Khanki, S., & Ashrafi, A. (2024). Final report: Long-term impacts of treated wastewater irrigation on soils of horticultural and agricultural lands in Hashtgerd and Mahdasht plains (Research report). Soil and Water Environmental Research Institute. (In Persian)
- Food and Agriculture Organization. (1989). *Wastewater quality guidelines for agricultural use* (Irrigation and Drainage Paper). FAO.
- Gabriel Filho, L. A., Cremasco, C. P., Putti, F. F., Goes, B. C., & Magalhães, M. M. (2016). Geometric analysis of net present value and internal rate of return. *Journal of Applied Mathematics and Informatics*, 34(1–2), 75–84.
- García-Tejero, I. F., Durán-Zuazo, V. H., Muriel-Fernández, J. L., & Rodríguez-Pleguezuelo, C. R. (2011). Water and sustainable agriculture. In V. H. Durán-Zuazo (Ed.), *Water and sustainable agriculture* (pp. 1–94). Springer.
- Ghezehei, S. B., Ewald, A. L., Hazel, D. W., Zalesny, R. S., Jr., & Nichols, E. G. (2021). Productivity and profitability of *Populus* on fertile and marginal sandy soils under different density and fertilization treatments. *Forests*, 12(7), 869.
- Goushehghir, Z., Feghhi, J., & Innes, J. L. (2022). Challenges facing the improvement of forest management in the Hyrcanian forests of Iran. *Forests*, 13(12), 2180.
- Holopainen, M., Mäkinen, A., Rasinmäki, J., Hyytiäinen, K., Bayazidi, S., & Pietilä, I. (2010). Comparison of various sources of uncertainty in stand-level net present value estimates. *Forest Policy and Economics*, 12(5), 377–386.
- Hamidi, M. N. (2025). Greywater reuse for irrigation: A critical review of suitability, treatment, and risks. *Science of the Total Environment*, 975, 179272.
- Heyde, B. J., et al. (2025). Transition from irrigation with untreated wastewater to treated wastewater and associated benefits and risks. *npj Clean Water*, 8. <https://www.isna.ir/news/1403070302208>.
- Jiménez, B., & Asano, T. (2008). *Water reuse: An international survey of current practice, issues, and needs*. IWA Publishing.
- Joshi, R., Sharma, B., Singh, H., Dhakal, N., Ayer, S., & Maraseni, T. (2024). *Populus* plantation as an agroforestry approach: Economic benefits and its role in carbon sequestration in North India. *Journal of Resources and Ecology*, 15(4), 880–888.
- Juhász, L. (2011). Net present value versus internal rate of return. *Economics & Sociology*, 4(1), 46–53.
- Kadlec, J., Novosadová, K., Macháčková, K., Sýkora, P., & Pokorný, R. (2026). Can *Paulownia* Siebold & Zucc. Become an Invasive Species via Its Seeds? *Plants (Basel, Switzerland)*, 15(7), 989.
- Keefe, K., Alavalapati, J. A. A., & Pinheiro, C. (2012). Is enrichment planting worth its costs? A financial cost-benefit analysis. *Forest Policy and Economics*, 23, 10–16.
- Lugli, L., Mezzalana, G., Lambardi, M., Zhang, H., & La Porta, N. (2023). *Paulownia* spp.: A Bibliometric



- Trend Analysis of a Global Multi-Use Tree. *Horticulturae*, 9(12), 1352.
- MAJ (2020). Agricultural statistics of Ministry of Agriculture-Jahad (Vol. 2). Tehran: Information and Communication Technology Center, Deputy of Planning and Economy, Ministry of Agriculture-Jahad (MAJ). (In Persian).
- Modir Rahmati, A. (2016). Development of wood cultivation: An inevitable and vital necessity for Iran. *Nature of Iran*, 1(1), 14–21. (In Persian)
- Mohammadi, Z., Mohammadi Limaiei, S., & Rostami Shahraji, T. (2019). Evaluating the most suitable tree species using land expectation value: A case study from plantation in northern Iran. *Asian Journal of Agricultural Extension, Economics & Sociology*, 31(4), 1–8.
- Negrușier, C., Buzan, L. R., Păcurar, I., Sîngeorzan, S. M., Ceuca, V., Colișar, A., et al. (2025). Economic sustainability assessment of Paulownia farms in a dual production system—Case studies in temperate climates. *Sustainability*, 17(1), 21.
- Olemborg, D., & Lupi, A. M. (2024). Economic analysis of Eucalyptus biomass cultivation for energy in Argentina. *Cleaner and Circular Bioeconomy*, 8, 100085.
- Qadir, M., Wichelns, D., Raschid-Sally, L., McCornick, P. G., Drechsel, P., Bahri, A., & Minhas, P. S. (2010). The challenges of wastewater irrigation in developing countries. *Agricultural Water Management*, 97(4), 561–568.
- RIFR (2020). Possibility of supplying 80% of the wood required by Iran's industry by implementing the national plan for the development of wood cultivation. Tehran: Research Institute of Forests and Rangelands (RIFR). Available at <https://rifr-ac.ir>. (In Persian).
- Sabiha, N. E., Salim, R., Rahman, S., & Rola-Rubzen, M. F. (2016). Measuring environmental sustainability in agriculture: A composite environmental impact index approach. *Journal of Environmental Management*, 166, 84–93.
- Shadmani, A., & Saleh, A. (2007). Investigation of methods used in financial and economic evaluation of investment projects in the agricultural sector of Iran. In *Proceedings of the Sixth Iranian Agricultural Economics Conference*. Ferdowsi University of Mashhad. (In Persian)
- Shahbazi, A., Khalighi Sigarodi, S., Malekian, A., & Salajegh, A. (2017). Sensitivity analysis of input parameters of SWMM model to urban runoff management (Case study: Mahdasht Town). *Watershed Management Research*, 30(1), 67–75.
- Silva, J. O., Monteiro, F. G., dos Santos, L. A., da Rocha, J. E., & Miranda, G. M. (2020). Economic viability in *Eucalyptus* spp. clonal plantation for production of pulp. *Floresta e Ambiente*, 27(4).
- Tavakoli Nekoo, H., & Poormeidani, A. (2021). *Cultivation of eucalyptus wood in the central regions of Iran*. Research Institute of Forests and Rangelands (RIFR). (In Persian)
- Testa, R., Schifani, G., Rizzo, G., & Migliore, G. (2022). Assessing the economic profitability of Paulownia as a biomass crop in Southern Mediterranean area. *Journal of Cleaner Production*, 336, 130426.
- Toze, S. (2006). Reuse of effluent water—Benefits and risks. *Agricultural Water Management*, 80(1–3), 147–159.
- U.S. Environmental Protection Agency. (1977). *Process design manual for land treatment of municipal wastewater* (Report No. 625/1-77-008). U.S. Environmental Protection Agency.
- Vahidi, Z., & Salehnia, M. (2023). Economic analysis of wood farming development plans in Iran. *Agricultural Economics and Development*, 31(2), 185–208.
- Viccaro, M., Cozzi, M., Caniani, D., Masi, S., Mancini, I. M., Caivano, M., & Romano, S. (2017). Wastewater reuse: An economic perspective to identify suitable areas for *Populus* vegetation filter systems for energy production. *Sustainability*, 9(12), 2161.
- Wang, Y., Bai, G., Shao, G., & Cao, Y. (2014). An analysis of potential investment returns and their determinants of *Populus* plantations in state-owned forest enterprises of China. *New Forests*, 45(2), 251–264.
- World Health Organization. (1989). *Health guidelines for the use of wastewater in agriculture* (Technical Report Series No. 778). World Health Organization.
- World Health Organization. (2006). *Guidelines for the safe use of wastewater, excreta and greywater* (Vol. 4). World Health Organization.
- Zhang, P., He, Y., Feng, Y., De La Torre, R., Jia, H., Tang, J., & Cubbage, F. (2019). An analysis of potential investment returns of planted forests in South China. *New Forests*, 50(6), 943–968.