

A Multi-Criteria Decision-Making Model for Green Roof Plant Selection in Tehran Metropolis

Ardalan Fazeli¹; Peyman Golchin²; Iman Saeedi^{3*}

1. PhD Student in Environmental Design, Faculty of Environment, University of Tehran, Tehran, Iran

2. Lecturer, Department of Landscape Engineering, University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran

*3. Assistant Professor, Department of Environmental Science and Engineering, Faculty of Natural Resources and Environment, Malayer University, Malayer, Iran

*Email Address: Isaeedi@malayeru.ac.ir

Article Info	ABSTRACT
Article Type: Research Paper	With the intensification of urbanization and the expansion of urban heat islands in Tehran, green roofs have become an important sustainable infrastructure for improving environmental quality. The principal challenge to the long-term performance of these systems is the selection of plant species that are compatible with roof structural constraints, the semi-arid climate, and severe temperature fluctuations. This study develops a multi-criteria decision-making model for selecting appropriate green-roof plant species in Tehran. Evaluation indicators were first screened and finalized using the Fuzzy Delphi Method with a seven-member expert panel. The criteria were then weighted using the Analytic Hierarchy Process. The results showed that low water requirement and ecological resilience were the most influential considerations. Ten plant species were evaluated using the final criteria. <i>Festuca ovina</i> obtained the highest final score and ranked first, followed by <i>Lavandula angustifolia</i> and <i>Rosmarinus officinalis</i>. In contrast, <i>Rhododendron simsii</i> and <i>Chamaecyparis lawsoniana</i> received the lowest scores because of higher water demand and lower compatibility with the roof microclimate. The findings indicate that prioritizing ecological sustainability over purely aesthetic criteria can improve the persistence and manageability of green roofs in Tehran and provide a practical decision-support framework for designers and urban managers.
Article History:	
Received Date: 2026/08/18	
Revised Date: 2026/09/01	
Accepted Date: 2026/10/27	
Published Date: 2026/10/28	
Keywords: Plant species selection, Green roof, Ecological sustainability, Fuzzy Delphi, Analytic Hierarchy Process (AHP), Tehran.	

Cite this article: Ardalan Fazeli, Peyman Golchin, Iman Saeedi (2026) A Multi-Criteria Decision-Making Model for Green Roof Plant Selection in Tehran Metropolis, Journal of Environmental Sciences Studies, 11(3), Pages 11388-11403.

EXTENDED ABSTRACT

Introduction

Urbanization and climate change have increased environmental pressure on metropolitan ecosystems, contributing to urban heat islands, biodiversity loss and reduced ecological resilience. Green roofs provide additional vegetation on otherwise unused roof surfaces and can support thermal moderation, stormwater retention, pollution reduction and urban biodiversity. Their performance, however, depends strongly on the persistence of the selected vegetation. Roof environments in Tehran are particularly stressful because of shallow substrates, restricted water and nutrient availability, intense solar radiation, strong winds and pronounced seasonal temperature fluctuations. Field observations reported by the authors indicate that plant selection in many Tehran green-roof projects is still strongly influenced by appearance, while ecological compatibility receives less attention. This can result in plant loss, repeated replacement and increased irrigation and maintenance requirements. Accordingly, the study aimed to develop a practical, locally applicable model that integrates ecological, biological, aesthetic and economic considerations for selecting sustainable green-roof vegetation in Tehran.

Materials and Methods

The study used a combined Fuzzy Delphi Method (FDM) and Analytic Hierarchy Process (AHP). Candidate criteria and plant species were identified through review of the scientific literature and field investigation of implemented green-roof projects in Tehran. Ten plant species were selected for evaluation, including *Festuca ovina*, *Lavandula angustifolia*, *Rosmarinus officinalis*, *Lippia nodiflora*, *Pennisetum* sp., *Pittosporum* sp., *Ligustrum japonicum*, *Sedum* sp., *Rhododendron simsii* and *Chamaecyparis lawsoniana*. A panel of seven experts representing horticulture, landscape architecture, urban ecology, green-roof implementation, botany, municipal green-space management and structural engineering participated in the evaluation. Expert judgments were represented by triangular fuzzy numbers and defuzzified using a centroid approach. Indicators above the stated threshold of 0.6 were retained. AHP pairwise comparisons were then used to determine the relative importance of the final criteria. The reported consistency ratio was 0.06.

Results and Discussion

The findings showed that ecological considerations were the most influential factors in selecting plant species for green roofs in Tehran. Among the major groups of criteria, ecological characteristics, particularly low water requirement and resistance to environmental stresses, received the highest final weight of 0.45. This result reflects the importance of water limitation, drought tolerance, and climatic adaptation in the semi-arid environment of Tehran. Biological sustainability, including characteristics associated with plant longevity, growth, and persistence, ranked second with a weight of 0.25. Aesthetic and visual characteristics received a weight of 0.18, while economic criteria related to plant purchase and maintenance accounted for a weight of 0.12. Ecological characteristics, particularly low water requirement and environmental resistance, received the highest final weight (0.45). Biological sustainability ranked second (0.25), aesthetic and visual characteristics third (0.18), and economic criteria fourth (0.12). *Festuca ovina* achieved the highest final score (0.942), followed by *Lavandula angustifolia* (0.885) and *Rosmarinus officinalis* (0.820). *Lippia nodiflora* and *Pennisetum* sp. occupied intermediate positions. *Rhododendron simsii* and *Chamaecyparis lawsoniana* were among the lowest-ranked alternatives because of greater maintenance requirements and lower compatibility with Tehran roof conditions. The findings show that species able to tolerate drought, temperature fluctuation, shallow substrates and low-input management provide a stronger basis for long-term green-roof performance than choices driven mainly by ornamental value.

Conclusion

The present study developed a locally oriented multi-criteria decision-support model for selecting plant species for green roofs in Tehran using a combined Fuzzy Delphi Method and Analytic Hierarchy Process. The results demonstrated that ecological considerations, particularly low water demand and resistance to environmental stresses, should have the greatest influence on plant selection under Tehran's semi-arid climatic conditions. Biological sustainability was the second most important criterion, whereas aesthetic and economic considerations, although relevant, received lower relative weights. Among the ten evaluated plant species, *Festuca ovina*, *Lavandula angustifolia*, and *Rosmarinus officinalis* were identified as the most suitable alternatives. Their strong performance was associated with relatively low water requirements, tolerance to environmental stresses, adaptability to rooftop conditions, and manageable maintenance needs. In contrast, *Rhododendron simsii* and *Chamaecyparis lawsoniana* showed lower suitability because of their greater ecological and management requirements.



FANPAYA

Knowledge Based Company
(PUBLISHER)

الگوی تصمیم‌گیری چندمعیاره برای گزینش پوشش گیاهی بام‌های سبز در کلان‌شهر تهران

اردلان فاضلی^۱، پیمان گلچین^۲، ایمان سعیدی^{۳*}

۱- دانشجوی دکتری طراحی محیط زیست، دانشکده محیط زیست، دانشگاه تهران، تهران، ایران

۲- مربی گروه مهندسی فضای سبز، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران

۳*- استادیار گروه علوم و مهندسی محیط زیست، دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست، دانشگاه ملایر، ملایر، ایران

ایمیل نویسنده مسئول: Isaeeedi@malayeru.ac.ir

چکیده	اطلاعات مقاله
با تشدید روند شهرنشینی و گسترش جزایر حرارتی در کلان‌شهر تهران، توسعه بام‌های سبز به عنوان زیرساختی پایدار جهت بهبود کیفیت زیست‌محیطی ضرورتی انکارناپذیر یافته است. چالش اصلی در پایداری این سیستم‌ها، انتخاب گونه‌های گیاهی است که علاوه بر محدودیت‌های سازه‌ای بام، با اقلیم نیمه‌خشک و نوسانات دمایی شدید تهران سازگاری داشته باشند. پژوهش حاضر با هدف تدوین الگوی جامع انتخاب گونه‌های گیاهی، از یک رویکرد ترکیبی تصمیم‌گیری چندمعیاره استفاده کرده است. در مرحله نخست، شاخص‌های ارزیابی با استفاده از روش دلفی فازی و با مشارکت پانل خبرگان غربالگری و نهایی شدند. سپس، وزن‌دهی به معیارها با استفاده از فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی انجام گرفت. نتایج حاکی از اولویت بالای معیارهای نیاز آبی کم و مقاومت اکولوژیک بود. ارزیابی ۱۰ گونه گیاهی منتخب نشان داد گونه فستوکا (<i>Festuca ovina</i>) مناسب‌ترین گزینه است و پس از آن اسطوخودوس و رزماری قرار دارند. در مقابل، آزالیا و سرو لاوسن به دلیل نیاز آبی بیشتر و سازگاری کمتر با میکروکلیمای بام، کمترین امتیاز را به دست آوردند. یافته‌ها نشان می‌دهد انتقال اولویت از معیارهای صرفاً زیبایی‌شناختی به سمت پایداری اکولوژیک می‌تواند موفقیت بام‌های سبز تهران را افزایش دهد و مدل پیشنهادی به عنوان ابزار تصمیم‌یار در اختیار طراحان و مدیران شهری قرار گیرد.	نوع مقاله: مقاله علمی پژوهشی تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۵/۲۷ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۰۶/۱۰ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۸/۰۵ تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۸/۰۶
	کلید واژه‌ها: انتخاب گونه‌های گیاهی، بام سبز، پایداری اکولوژیک، دلفی فازی، تحلیل سلسله‌مراتبی، تهران.

ناشر: انتشارات فن پایا

DOI: 10.22034/jess.2026.597763.2480

۱- مقدمه

امروزه تشدید تغییرات اقلیمی و افزایش سرعت شهرنشینی، فشار فزاینده‌ای را بر اکوسیستم‌های شهری وارد نموده است که این امر منجر به شکل‌گیری بحران‌هایی همچون پیدایش جزایر گرمایی، کاهش تنوع زیستی و تاب‌آوری اکولوژیکی گردیده است (Liu et al., 2021). احداث بام‌های سبز در کلان‌شهرها از جمله استراتژی‌های موثر در راستای احیای اکولوژیکی و سایر بحران‌های مطرح شده می‌باشد که توجه جهانی گسترده‌ای را به خود جلب کرده است (Bevilacqua, 2021) از آنجایی که سقف ساختمان‌ها، درصدی از مساحت شهری را به خود اختصاص می‌دهد، بام‌های سبز می‌توانند به طور مؤثری منجر به کاهش دمای هوا، مهار بارش باران، کاهش آلودگی و غیره شوند (Abass et al., 2020) میزان پایداری و بازده اکولوژیکی بام‌های سبز تا حد زیادی به گزینش دقیق و آگاهانه گونه‌های گیاهی وابسته است (Zhang et al., 2024) این بام‌ها از چالش برانگیزترین بسترهای کاشت محسوب می‌شوند، زیرا گیاهان در آن با عمق کم بستر کاشت، محدودیت مواد مغذی و آب، تابش مستقیم و شدید نور خورشید و حضور آلاینده‌های جوی در سطوح بالا روبه‌رو هستند (Aguir et al., 2019) در این راستا، برخی از پژوهش‌ها بر بررسی شاخص‌هایی همچون مقاومت گیاهان در برابر تنش‌های محیطی از جمله خشکسالی، سرما و کمبود عناصر غذایی تمرکز داشته‌اند (Thuring et al., 2014) در سال‌های اخیر نیز، موضوع شناسایی و انتخاب گونه‌های سازگار با ویژگی‌های اقلیمی و محیط زیستی هر منطقه به یکی از محورهای مهم پژوهش‌های مرتبط با اکولوژی شهری در سطح بین‌المللی تبدیل شده و پیشرفت‌هایی در این زمینه حاصل گردیده است (Vijayaraghavan, 2016). با وجود این، همچنان مطالعات اندکی درباره تحمل درختان و درختچه‌ها در برابر خشکی و گرمای شدید و شرایط سخت محیط پست بام‌ها صورت گرفته است در حالی که بیشتر تحقیقات بر مسائلی نظیر وزن سازه‌ای بام و کارایی سامانه‌های زهکشی متمرکز بوده‌اند (Xiao et al., 2014). بر این اساس، انتخاب هوشمندانه گونه‌های گیاهی متناسب با شرایط خاص بام یکی از عناصر کلیدی در طراحی بام‌های سبز به‌شمار می‌آید و نیازمند بررسی دقیق مجموعه‌ای از عوامل و ارزیابی مزایا و محدودیت‌های هر گونه است (Leotta et al., 2023). در بام‌های سبز شهر تهران، انتخاب گونه‌های گیاهی معمولاً بر اساس ویژگی‌های ظاهری و زیبایی‌شناسی گیاهان انجام می‌شود و توجه کمتری به ملاحظات اکولوژیکی، ارزیابی‌های علمی و آزمون‌های تجربی می‌شود. این رویکرد، به شکل گسترده‌ای منجر به کاشت گونه‌هایی شده است که پس از گذشت مدت زمان نسبتاً کوتاهی در محیط سخت بام‌های شهری خشک می‌شوند. این روند موجب نیاز به باز کاشت مکرر گیاهان یا رهاسازی آن‌ها شده که این امر چالش‌های هزینه‌ای و مدیریتی فراوانی را برای بهره‌برداران و سازندگان بام‌های سبز تهران ایجاد کرده است. بنابراین، این موضوع به یکی از چالش‌های اساسی و جدی در توسعه پایدار بام‌های سبز در این کلانشهر تبدیل شده است. محیط بام‌های سبز شهری تهران با ویژگی‌هایی مانند بستر کاشت کم‌عمق، نوسانات شدید دمایی شامل گرمای شدید روز و سرمای زمستانی، وزش بادهای شدید، تابش شدید نور خورشید و منابع محدود آب و مواد مغذی، از شرایط بسیار پرتنش و نامساعد برای رشد گیاهان برخوردار است. با توجه به پیچیدگی‌های محیط زیستی و مدیریتی یاد شده، توسعه چارچوبی کاربردی و بومی که شاخص‌ها و معیارهای لازم برای انتخاب گونه‌های گیاهی سازگار و مقاوم را به شکل جامع مطرح نماید، می‌تواند به عنوان ابزاری کارآمد در طراحی و مدیریت بام‌های سبز تهران مورد استفاده قرار گیرد. بنابراین، هدف اصلی این پژوهش، تدوین نمونه‌ای علمی و عملی برای انتخاب و معرفی گونه‌های گیاهی مناسب است تا روند تصمیم‌گیری در خصوص گیاه‌گزینی بام‌های سبز به سمت انتخاب‌های پایدار، علمی و زیباشناختی هدایت شود. در راستای این هدف، پژوهش حاضر دو پرسش کلیدی را مطرح می‌کند: نخست اینکه، شاخص‌ها و معیارهای لازم و جامع برای تدوین الگویی کاربردی در انتخاب گونه‌های گیاهی بام‌های سبز کدامند که بتوانند ضمن تطابق با شرایط اقلیمی، فیزیولوژیکی، سازه‌ای و زیبایی‌شناسی، دوام و کارایی پوشش گیاهی را برای بلندمدت تضمین کنند و هم‌زمان کیفیت محیط زندگی شهری را بهبود بخشند؟ دوم اینکه، بر اساس مرور نظام‌مند پژوهش‌های مرتبط و استخراج شاخص‌ها، چه گونه‌های گیاهی تناسب بیشتری را برای کاشت در بام‌های سبز شهر تهران دارند و می‌توانند پاسخ‌گوی نیازهای اکولوژیکی و زیبایی‌شناسی باشند؟

• مبانی نظری

بام‌های سبز، که با عناوینی مانند سقف‌های پوشیده از پوشش گیاهی، سقف‌های خنک، سقف‌های اکولوژیکی به دلیل فواید زیستی، باغ‌های پشت‌بام یا سقف‌های زنده نیز شناخته می‌شوند، در اصل به سقف‌هایی اشاره دارند که انواع مختلف پوشش گیاهی بر روی بستری مناسب برای رشد کاشته شده است. این مفهوم با هدف تشویق و ترویج پوشش گیاهی بر روی سقف ساختمان‌ها طراحی شده است تا بتواند مزایای متعددی از جنبه‌های اجتماعی، اقتصادی و زیست‌محیطی ارائه نماید (Francis et al., 2011). بام سبز، منظری با فواید اکولوژیکی است که با کاشت گیاهان منظر روی پشت بام ساختمان‌ها ایجاد می‌شود. این پوشش گیاهی بخشی از اکوسیستم شهری است که باعث افزایش فضای سبز و تنوع زیستی شهر می‌شود. اندازه و شکل این فضا در بهبود تنوع زیستی و پایداری اکوسیستم نقش دارد

Semeraro et al., 2021) اجرای بام سبز نه تنها به زیبا سازی محیط شهری کمک می‌کند، بلکه تاثیر مثبت محسوس در بهبود کیفیت هوا، کاهش آلودگی هوا و صوت، کاستن اثرات مخرب گازهای گلخانه‌ای، ممانعت از تابش مستقیم پرتوهای فرابنفش به ساختمان، کاهش دمای محیط، افزایش رطوبت نسبی، مقابله با پدیده جزیره حرارتی شهر، ذخیره انرژی و در نهایت ارتقاء کیفیت زیست محیطی و رفاه ساکنان شهر دارد (Shafique et al., 2018) بام‌های سبز بر اساس ارتفاع بستر خاک و میزان نیاز به نگهداری به سه نوع گسترده، نیمه‌فشرده و فشرده تقسیم می‌شوند که رایج‌ترین سیستم طبقه‌بندی است (Abass et al., 2020). بام‌های گسترده به خاطر سبکی و نیاز کم به نگهداری، کم‌هزینه‌تر بوده و بیشتر برای اهداف اکولوژیکی طراحی شده‌اند (Ampim et al., 2010). در این نوع بام‌ها، گیاهان علفی و چمن‌ها با بستر کمتر از پانزده سانتی‌متر به کار می‌روند (Kader et al., 2022) (Jaffal et al., 2021). در مقابل، بام‌های فشرده دارای بسترهای ضخیم‌تر، وزن بیشتر، دسترسی آسان و هزینه‌های نگهداری بالاتر هستند (Coma et al., 2018) انتخاب گونه‌های گیاهی برای بام‌های گسترده بر گونه‌هایی متمرکز است که مقاومت به خشکی، رشد خوابیده، برگ همیشه‌سبز و دوره گل‌دهی طولانی دارند، در حالی که بام‌های فشرده امکان استفاده از گونه‌های متنوع‌تری از جمله درختچه‌ها و درختان را فراهم می‌کنند که باعث افزایش پوشش گیاهی و بهبود کیفیت هوا می‌شود (Rowe., 2011) بام سبز به عنوان یک فناوری تاریخی به ۵۰۰ سال پیش از میلاد بازمی‌گردد که نمونه اولیه آن، باغ‌های معلق بابل است (Li et al., 2014) شکل مدرن این فناوری در اوایل دهه ۱۹۶۰ در آلمان آغاز شد؛ کشوری که به دلیل توسعه، طراحی و اجرای گسترده بام‌های سبز در مقیاس وسیع، به‌عنوان پیشرو در این زمینه شناخته می‌شود (Zhang et al., 2011) در چهار دهه اخیر، کشورهای آلمان و ایالات متحده مفاهیم بام سبز را به‌عنوان راهکاری برای کاهش آلودگی‌های محیط زیستی شهری بازتعریف کرده‌اند (Thuring et al., 2014) (Bousselot et al., 2020) اخیراً، جنبه‌های اکولوژیکی بیش از جنبه‌های زیبایی‌شناسی در انتخاب گیاهان برای بام‌های سبز اهمیت یافته است؛ چرا که تأثیرات مثبت زیست‌محیطی این زیرساخت‌ها در مناطق شهری معیار اصلی انتخاب گیاهان شده است (Leotta et al., 2023). در ایران، با وجود سابقه ایجاد فضای سبز روی بام در معماری قدیم، توسعه مدرن باغ‌سازی روی بام بیشتر به تأثیرات پیشرفت‌های جهانی در کشورهای توسعه‌یافته، به‌ویژه اروپا، وابسته است. با این حال، بررسی پروژه‌های بام سبز در تهران نشان می‌دهد گسترش این فناوری در ایران هم‌راستا با روند جهانی نبوده است. باغ‌سازی روی بام در ایران ترکیبی دوگانه از سبک منظره‌سازی سنتی ایرانی، با نمادپردازی خاص و فضاسازی احساسی، و گرایش به سبک‌های لوکس و مدرن با حالتی اشرافی دارد. این در حالی است که در اروپا تمرکز بیشتر بر جنبه‌های محیطی و اکولوژیکی است. مهم‌ترین تفاوت بام‌های سبز ایران با نمونه‌های جهانی، فقدان انگیزه‌های محیط زیستی در ایجاد آنهاست (Eskandari et al., 2016). با این حال، تشویق مردم به اجرای طرح‌های بام سبز در تهران می‌تواند تا حدود یک پنجم سطح شهر را به فضای سبز تبدیل کند و تأثیر قابل توجهی در کاهش آلودگی هوا داشته باشد (Taghavi., 2014) بام‌های سبز بخش مهمی از زیرساخت‌های سبز شهری به شمار می‌آیند. گیاهان کاشته شده روی بام‌ها نقش کلیدی در مدیریت آب باران ایفا می‌کنند؛ آن‌ها با جذب و نگهداری آب باران، که به ویژگی‌های ریشه، برگ و اندازه گیاه وابسته است، در کاهش رواناب مؤثر هستند (Stovin., 2010). همچنین بام‌های سبز به ذخیره کربن در سطوح بالایی و پایینی زمین کمک می‌کنند و فضایی برای زیست پرندگان، پروانه‌ها و میکروارگانیسم‌ها فراهم می‌آورند که این امر موجب افزایش تنوع زیستی و تقویت تاب‌آوری اکوسیستم می‌گردد (Demuzere et al., 2014) (Mayrand et al., 2018) (Knapp et al., 2019).

• پیشینه پژوهش

بام‌های سبز به‌عنوان جایگزینی پایدار برای بام‌های معمولی، به کاربرد پوشش گیاهی برای پوشش بام ساختمان‌ها اشاره دارد (Refahi et al., 2015). استفاده از بام‌های سبز در بخش‌های مختلف خصوصی و دولتی به دلیل برخورداری از مزایای متعدد در حال افزایش است (Pianella et al., 2016) این بام‌ها یکی از راهکارهای مؤثر برای افزایش فضای سبز شهری به شمار می‌روند (Susca et al., 2011). بام‌های سبز با ارائه مزایای اکولوژیکی، اقتصادی و اجتماعی گوناگون، نقشی مهم در ارتقای تاب‌آوری شهری ایفا می‌کنند. آن‌ها با فیلتر کردن آلاینده‌ها، کاهش مصرف انرژی از طریق عایق‌بندی، کاهش دمای عمومی در مناطق شهری، و افزایش تنوع زیستی با ایجاد زیستگاه برای گیاهان و جانوران، به بهبود کیفیت هوا کمک می‌کنند. علاوه بر این، بام‌های سبز با ذخیره‌سازی آب باران و کاهش رواناب، مدیریت آب‌های سطحی را بهبود می‌بخشند (Leong., 2025) تحقیقات نشان داده‌اند که بام‌های سبز به‌عنوان اکوسیستم‌های شهری نوین، به دلیل عمق کم بستر کاشت و محدودیت منابع آب، با چالش‌هایی در رشد و بقای گیاهان مواجه‌اند. در اقلیم‌های خشک و نیمه‌خشک، کم‌آبی و تنش دمایی مهم‌ترین عوامل مرگ و میر گیاهان محسوب می‌شوند و می‌توانند موجب کاهش پوشش گیاهی و افزایش هزینه‌های نگهداری شوند (Du et al., 2010) نگهداری پوشش گیاهی در بام‌ها با وجود مزایا، با چالش‌های متعددی همراه است و بقا و تنوع گیاهان به عواملی مانند عمق بستر، شرایط محیطی و انتخاب گونه‌های مناسب بستگی دارد. علاوه بر این، مشکلاتی

نظیر آلودگی هوا، حضور گونه‌های مهاجم و تغییرات اقلیمی حفاظت از گیاهان را دشوار می‌سازد (Salman et al., 2019). شرایط سخت و خاص محیطی پشت‌بام نیز در بقای گیاهان نقش تعیین‌کننده دارد. برای نمونه، مطالعاتی (Calheiros et al., 2023) که بر انتخاب گونه‌های گیاهی از زیستگاه‌های طبیعی در جنوب فرانسه متمرکز بوده‌اند، گونه‌هایی را به‌عنوان گیاهان بالقوه مناسب برای بام‌های سبز مدیترانه‌ای گرم و خشک معرفی کردند. با وجود این، نتایج نشان داد که این گونه‌ها ممکن است در شرایط خاص بام‌های سبز به دلایل مختلف، از جمله تنش‌های حرارتی و محدودیت‌های آبی، دوام نیاورند. از این‌رو ارزیابی گونه‌های بالقوه جدید برای استفاده در بام‌های سبز ضروری است (Van Mechelen et al., 2014) (Benvenuti et al., 2010) (Vestrella et al., 2015) (Zhang et al., 2014). موفقیت بام‌های سبز به سلامت و پایداری گیاهان وابسته است. در انتخاب گونه‌ها باید عواملی از قبیل عمق بستر کاشت، شرایط اقلیمی و حضور گیاهان بومی منطقه در نظر گرفته شود (Shafique et al., 2018). انتخاب دقیق و علمی گونه‌هایی که با اقلیم منطقه و ویژگی‌های محیطی بام سازگارند، بقای گیاهان را تضمین کرده و شرایط را برای استقرار سایر گونه‌ها فراهم می‌کند. مطالعات نشان داده است که گونه‌های مقاوم به شرایط سخت محیطی می‌توانند استقرار گونه‌های حساس‌تر را تسهیل کنند؛ در نتیجه، انتخاب گیاهان مقاوم و سازگار با بام‌های سبز، به پایداری و تنوع جامعه گیاهی کمک می‌کند (Muratet et al., 2024). شاخص‌های مؤثر در انتخاب گیاهان برای بام‌های سبز به عوامل مختلفی بستگی دارد. این معیارها بر اساس مطالعات پژوهشگران متعدد در زمینه انتخاب گیاهان برای بام‌های سبز تدوین شده است (جدول یک). (توجه به این معیارها و اولویت‌بندی آن‌ها می‌تواند گامی مؤثر در تعیین گونه‌های مناسب برای بام‌های سبز تهران باشد.

جدول ۱: تحقیقات علمی صورت گرفته بر روی شاخص‌های مؤثر در انتخاب گیاهان جهت کاشت در سبز بام (منبع: نویسندگان، ۱۴۰۵).

پژوهش‌ها	معیارها
(Yang)	ظرفیت باربری سازه، نوع بستر رشد، تحمل باد های شدید، قرار گرفتن در معرض آفتاب، زیبایی شناسی، مقاومت در برابر خشکی و تحمل گرما، مقاوم به کم آبی، مقاوم به آفات و بیماری ها، پوشش‌دهی گسترده، رشد نسبتاً یکنواخت و پایدار، قابلیت جذب گرد و غبار.
(Shafique et al)	شرایط اقلیمی، بومی بودن، عمق خاک، سازگاری با شرایط اکولوژیک منطقه.
(Dvorak et al) (Farrell et al) (Gabrych et al)	مقاومت در برابر خشکسالی، تحمل اقلیم سخت، دسترسی آسان، مقرون به صرفه بودن گیاه، عدم نیاز به آبیاری منظم، تحمل به حداقل مواد مغذی، نگهداری کم، تبخیر و تعرق بیشتر و تکثیر سریع.
(Dirks et al)	تحمل گرمای شدید، تحمل تابش نور خورشید، تحمل خشکسالی، تحمل شوری خاک، تحمل باد های شدید و تحمل محدودیت بستر.
(De Palma et al)	دسترسی به مواد مغذی، مقاوم به کم آبی، تحمل به گرما و سرما، تحمل به خشکسالی فیزیولوژیکی، عمق مناسب خاک.
(Reginaldo et al)	تحمل تنش آبی (خشکسالی و سیل)، تحمل تابش زیاد، تحمل تنش دمایی (گرم و سرما)، تحمل به محدودیت مواد مغذی معدنی، تحمل به شوری و معماری مناسب گیاه (ریشه‌های کم‌عمق و شاخه‌های محکم و فشرده).
(Leotta et al)	سازگاری با خشکسالی، ویژگی‌های مورفوفیزیولوژیکی و خودتنظیمی (استراتژی باز زایی، وجود بانک بذر، طول عمر گیاه)
(Mobasheri)	عمق خاک
(Vijayaraghavan et al)	بومی بودن گیاهان، تحمل آب و هوای خشک
(Esfahani et al)	مقاومت در برابر خشکی، تحمل به تابش شدید خورشید، زیبایی شناختی، پوشش دهی گسترده
(Schweitzer et al)	مقاومت بالا به خشکسالی
(Farrell et al)	ویژگی‌های گیاهی، الگوی زیستگاه (گیاهان بومی)، مقاوم به کم آبی، ذخیره آب در برگ، مقاوم به خشکی
(Hamar-Farkas et al)	مقاومت در برابر خشکی، تحمل تغییرات دما، زیبایی شناختی
(Yin et al)	مقاومت بالا به خشکسالی، مقاومت به شرایط نامساعد محیطی، تحمل اقلیم سرد و خشک.
(Bousselot et al)	گیاهان چندساله و مقاوم، دارای سیستم ریشه‌ای افقی و گسترده و بدون ریشه عمقی، نیاز غذایی و آبی پایین، غیرتهاجمی، مقاومت نسبت به تابستان‌های گرم و زمستان‌های سرد و خشک، تحمل باد و خورشید شدید، رشد متراکم و پخش‌شونده، سازگار با اقلیم بومی منطقه یا مناطق با اقلیم مشابه به منظور کاهش هزینه‌های نگهداری و افزایش پایداری
(Thuring et al)	مقاومت گیاه در برابر تنش مانند تحمل به خشکی، مقاومت به سرما و سازگاری با خاک فقیر از نظر مواد مغذی
(Liberalesso et al)	عملکردهای اکولوژیکی (مانند ترسیب کربن و حفظ آب) و ارزش منظر.
(Aguiar et al)	سازگار با بسترهای کم‌عمق، نیاز کم به مواد غذایی، مقاوم به کم آبی، تحمل تابش زیاد خورشید، تحمل سطوح بالای آلاینده‌ها،
(Vahdati et al)	تحمل سرمای شدید، تحمل گرمای شدید، تحمل به تنش خشکی.

مطالعات اندکی در زمینه گونه های کاشته شده در سبز بام های جهان صورت گرفته است. با این وجود به منظور شناسایی گونه های گیاهی کاشته شده در این سبز بام ها، مقالاتی مطالعه گردید و گونه های گیاهی سبز بام ها در اقلیم های مشابه شهر تهران مورد بررسی قرار گرفت (جدول ۲). برخی از این گیاهان نسبت به شرایط سخت پشت بام ها مقاومت خوبی از خود نشان داده اند ولی تعداد زیادی از آن ها نیز مناسب سبز بام ها نمی باشند. لازم به ذکر است که اکثر گونه های کاشته شده در این سبز بام ها بیشتر به خاطر جنبه های زیبایی شناسی بوده است و توجه چندانی به شرایط اکولوژیکی منطقه و جنبه های زیست محیطی گیاهان نشده است.

جدول ۲: گونه های گیاهی کاشته شده بر روی سبز بام ها در تهران و اقلیم های مشابه (منبع: نویسندگان، ۱۴۰۴).

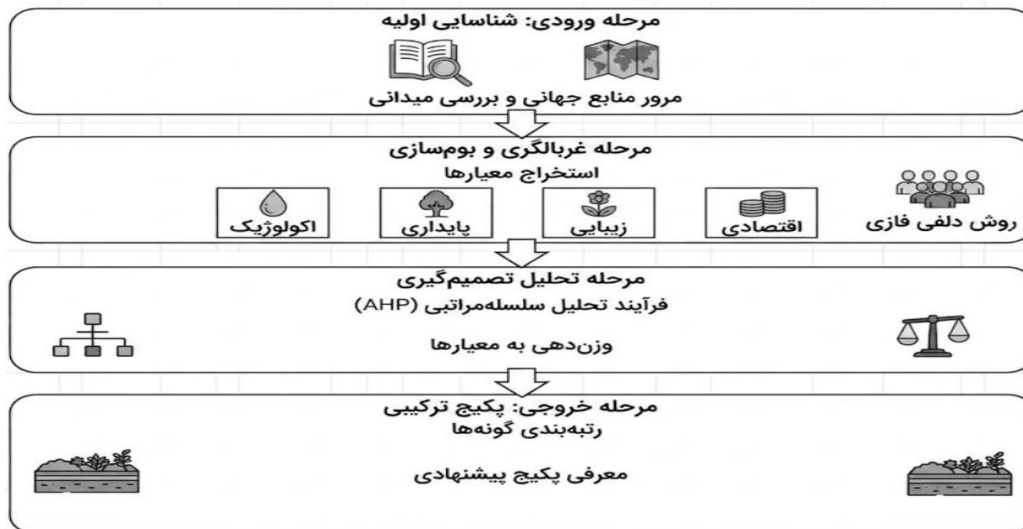
نام علمی	نام گونه	پژوهش ها
1- Carpobrotus edulis 2- Frankenia thymifolia 3- Potentilla. Sp 4- Vinca minor 5- Sedum spurinum 6-succulent	۱- دم عقربی ۲- شبنمی ۳- پنجه برگی ۴- پیچ تلگرافی ۵- ناز قرمز ۶- ساکولنت ها	(Vahdati et al)
1- sedum sp 2- Festuca sp	۱- سدوم ها ۲- فستوکاها	(Yin et al)
1- Portulaca grandiflora 2- sedum sp	۱- ناز آفتابی ۲- سدوم ها	Vijayaraghavan et al)
1- Festuca glauca 'Uchte' 2- Festuca amethystina 'Walberla'	۱- فستوکا گلوکا ۲- فستوکا آمیتستینا	(Hamar-Farkas et al)
1- Antirrhinum linkianum	۱- گل میمون	(Esfahani et al)
1- sedum sp	۱- سدوم ها	(Rayner et al)
1- Aptenia cordi folia	۱- ناز یخی	(Schweitzer et al)
1- Delosperma nubigenum 2- Hesperaloe parviflora 3- Opuntia sp 4- Penstemon pinifolii 5- Agave parryi	۱- دلوسپرما ۲- هسپرالو ۳- کاکتوس اپونتیا ۴- پنستمون ۵- آگاو پری	بام سبز باغ گیاهشناسی دنور کلرادو (Bousselot et al)
1- chilopsis linearis 2- Daphne cenorum 3- Rosa 'Darlos Enigma' 4- Aubrieta sp. 5- Acantholimon hohenackeri 6- Androsace sarmentosa v chumbyii 7- Armeria trojana 8- Artemisia virdis 9- Delphinium nelsonii 10- Dianthus anatolicus 11- Allium Azureum 12- Phlox condensate	۱- چیلوپسیس (بید بیابانی) ۲- درختچه دافنه ۳- نوعی رز ۴- اوبریتا ۵- کلاه میر حسن ۶- یاسمن صخره ایی ۷- آرمیریا ۸- درمنه ۹- زبان در قفا ۱۰- میخک ۱۱- سیر پیاز زینتی ۱۲- فلوکس	بام سبز موزه هنر معاصر دنور (Bousselot et al)
1- Fraxinus americana 2- Liriodendron tulipifera, 3- Prunus cerasifera 4- Picea pungens 5- Pinus edulis 6- Hibiscus syriacus 7- Berberis thunbergii 8- Cornus alba 9- Forsythia sp 10- Lupine Lupinus 11- Coreopsis verticillata 12- Cotoneaster divaricatus	۱- زبان گنجشک ۲- درخت لاله ۳- آلوچه ۴- نوئل آبی ۵- کاج کلرادو ۶- ختمی درختچه ۷- زرشک ۸- زغال اخته سفید ۹- یاس زرد ۱۰- لوین ۱۱- کورئوپسیس ۱۲- شیرخشت	بام سبز One River Front دنور کلرادو (Bousselot et al)

با توجه به جدول یک و مطالعات صورت گرفته در زمینه معیارهای موثر در انتخاب گیاهان برای سبز بام ها، طبق نمودار یک میتوان به معیارها و زیرمعیارهای استخراج شده به منظور انتخاب گیاهان جهت کاشت در سبز بام ها اشاره نمود.

۲- روش انجام تحقیق

بر اساس مرور منابع علمی داخلی و جهانی (جدول ۱) و نیز بررسی میدانی گونه های کاشته شده در بامهای سبز تهران (جدول ۲)، چهار گروه اصلی از معیارهای مؤثر بر انتخاب گیاهان برای بام سبز شناسایی شدند: ویژگی های اکولوژیک (با تأکید بر کم آبی و مقاومت به تنش)، پایداری (طول عمر و دوام)، زیبایی شناسی بصری و ملاحظات اقتصادی. با این حال، صرف استخراج این معیارها از ادبیات جهانی، برای کاربرد در تهران کافی نیست؛ زیرا اقلیم نیمه خشک تهران با محدودیت شدید منابع آب، تابش فرابنفش بالا، نوسانات دمایی گسترده (تابستان های گرم و زمستان های سرد) و بار سازه ای محدود در پشتبامها، چالشهایی را ایجاد می کند که در بسیاری از پژوهش های پیشین در اروپا یا مناطق مرطوب، کمتر مورد توجه قرار گرفته است. از این رو، چارچوب مفهومی پژوهش حاضر (شکل ۱) بر اساس رویکرد بومگرایی تطبیقی تدوین شده است که در آن، معیارهای استخراج شده از ادبیات، با استفاده از روش دلفی فازی غربالگری و بومی سازی می شوند و سپس با کمک فرآیند تحلیل سلسله مراتبی وزن دهی نهایی می گردند. این چارچوب، برخلاف رویکردهای صرفاً تزئینی، بر پایداری اکولوژیک به عنوان محور اصلی تصمیم گیری تأکید دارد و مسیر «شناسایی» غربالگری «وزندگی» رتبه بندی را به گونه ای ترسیم می کند که خروجی آن، معرفی گونه هایی باشد که ضمن داشتن حداقل جذابیت بصری، بیشترین سازگاری را با شرایط

سخت پشتمان تهران داشته باشند. بدین ترتیب، این چارچوب، نه تنها خلأ نظری موجود در ادبیات داخلی را پر می‌کند، بلکه ابزاری عملیاتی برای طراحان و مدیران شهری فراهم می‌آورد تا از اتخاذ تصمیمات سلیقه‌ای و پرهزینه در پروژه‌های بام سبز جلوگیری کنند.



شکل ۱. چهارچوب مفهومی پژوهش حاضر

• شناسایی گونه‌های گیاهی و شاخص‌های ارزیابی

در گام نخست، به منظور تدوین الگوی جامع انتخاب گیاهان، فهرستی اولیه از گونه‌های مستعد برای بام‌های سبز تهران از طریق بررسی متون علمی و بازدیدهای میدانی از پروژه‌های اجرا شده توسط شرکت‌های تخصصی استخراج گردید. این لیست شامل ۱۰ گونه کلیدی از جمله فستوکا، اسطوخودوس، رزماری، یاس هلندی و سدوم‌ها می‌باشد که در شرایط سخت محیطی پشت‌بام‌ها مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. همزمان، معیارهای تصمیم‌گیری در چهار حوزه اصلی اقلیمی، زیستی، اقتصادی و نگهداری بر اساس پژوهش‌های پیشین شناسایی شدند. این معیارها زیربنای طراحی پرسشنامه اولیه برای ورود به فرآیند دلفی فازی را تشکیل دادند تا اطمینان حاصل شود که تمامی جنبه‌های پایدارسازی بام سبز در کلان‌شهر تهران لحاظ شده است.

• پیاده‌سازی روش دلفی فازی

دلفی یکی از روش‌های تصمیم‌گیری مبتنی بر نظر خبرگان است که با هدف دستیابی به توافق و اجماع درباره یک موضوع مشخص به کار می‌رود. در دلفی معمولی، دیدگاه خبرگان غالباً در قالب مقادیر قطعی ثبت می‌شود؛ در حالی که قضاوت‌های آنان حاصل دانش تخصصی، تجربه حرفه‌ای و برداشت ذهنی از موضوع مورد بررسی است. از این رو، وجود ابهام و عدم قطعیت در پاسخ‌های خبرگان اجتناب‌ناپذیر است (آذر و همکاران، ۱۳۹۵). به منظور انعکاس بهتر این ابهام، در پژوهش حاضر از منطق فازی در فرآیند دلفی استفاده شد. دلفی فازی این امکان را فراهم می‌کند که ارزیابی‌های کیفی خبرگان، به جای تبدیل فوری به یک مقدار قطعی، ابتدا در قالب اعداد فازی مثلی ثبت شوند. این رویکرد می‌تواند محدودیت‌هایی مانند دشواری بیان کامل دانش فرد در قالب یک عدد، تفاوت برداشت افراد از عباراتی مانند «زیاد» یا «کم»، تأثیر ذهنیت شخصی بر قضاوت‌ها و نبود اطلاعات دقیق را کاهش دهد (Sadrkhanlou et al., 2023). در واقع، استفاده از طیف‌های فازی با ماهیت تدریجی و ذهنی قضاوت‌های انسانی سازگاری بیشتری دارد و امکان می‌دهد دامنه ابهام موجود در ارزیابی‌های خبرگان در فرآیند تصمیم‌گیری حفظ شود (Habibi et al., 2015). ماهیت دلفی به طور مستقیم با دانش و ذهنیت خبرگان ارتباط دارد و به همین دلیل در گروه روش‌های تصمیم‌گیری نرم قرار می‌گیرد. در این روش، ارزیابی‌ها ابتدا از طریق عبارات زبانی انجام می‌شوند و سپس هر عبارت زبانی به یک عدد فازی مثلی با مؤلفه‌های حد پایین، مقدار میانی و حد بالا تبدیل می‌گردد. این شیوه در مقایسه با استفاده از یک عدد قطعی، تفاوت برداشت خبرگان از مفاهیم کیفی را بهتر منعکس می‌کند. دلفی فازی می‌تواند با دو هدف کلی پیش‌بینی یا غربالگری به کار گرفته شود. هنگامی که هدف پژوهش پیش‌بینی روندها یا برآورد آینده باشد، اجرای روش در چند دور متوالی امکان‌پذیر است؛ اما در مطالعاتی که هدف اصلی آن‌ها غربالگری و شناسایی معیارهای مناسب است، اجرای یک دور دلفی فازی می‌تواند کفایت داشته باشد. در پژوهش حاضر، دلفی فازی با هدف غربالگری معیارهای اولیه و ثانویه مؤثر بر انتخاب گونه‌های گیاهی مناسب برای بام‌های سبز شهر تهران اجرا شد و فرآیند در یک دور به پایان رسید. در این مرحله، پرسشنامه در اختیار هفت خبره دارای تخصص در حوزه‌های باغبانی، معماری منظر، اکولوژی شهری، اجرای بام سبز، گیاه‌شناسی، مدیریت فضای سبز و مهندسی سازه قرار گرفت. خبرگان میزان اهمیت هر معیار را بر اساس مقیاس زبانی پنج‌درجه‌ای شامل «بسیار کم»، «کم»، «متوسط»، «زیاد» و «بسیار زیاد» ارزیابی کردند. پس از تبدیل عبارات زبانی به اعداد فازی مثلی، نظرات خبرگان با استفاده از میانگین حسابی مؤلفه‌های متناظر تجمیع شد. سپس، مقدار قطعی هر معیار با روش مرکز ثقل و بر اساس رابطه زیر محاسبه گردید:

$$\text{Crisp}(A) = (l + m + u) / 3$$

در این رابطه: $Crisp(A)$ مقدار قطعی یا نهایی شده عدد فازی A پس از تبدیل آن به یک مقدار عددی مشخص، حد پایین عدد فازی؛ کمترین مقدار برآورد شده توسط خبرگان، m مقدار میانی یا محتمل ترین مقدار ارزیابی خبرگان، u حد بالای عدد فازی؛ بیشترین مقدار برآورد شده توسط خبرگان و عدد ۳ نیز تعداد مؤلفه های عدد فازی مثلی، یعنی حد پایین، مقدار میانی و حد بالا است. از آنجا که هدف این پژوهش غربالگری معیارها بود، دلفی فازی در یک دور انجام شد و پس از آن، پرسشنامه یا بازخورد آماری در دوره های بعدی برای خبرگان ارسال نشد. معیار پذیرش نیز مقدار قطعی ۰.۰۶ در نظر گرفته شد؛ بنابراین، معیارهایی که مقدار قطعی آن ها کمتر از ۰.۰۶ بود، حذف شدند و معیارهایی که مقدار قطعی آن ها برابر یا بیشتر از ۰.۰۶ به دست آمد، برای ورود به مرحله تحلیل سلسله مراتبی AHP حفظ شدند. در نتیجه، روش دلفی فازی امکان داد مجموعه معیارهای نهایی با لحاظ کردن عدم قطعیت قضاوت های خبرگان و با صرف زمان کمتر نسبت به اجرای چنددوره ای دلفی معمولی تعیین شود. چارچوب کلی اجرای این فرآیند در شکل ۳ ارائه شده است. به منظور رعایت تنوع تخصص و تجربیات علمی-اجرایی، ۷ خبره با ویژگی های زیر جهت تکمیل پرسشنامه ها انتخاب شدند (جدول ۳).

جدول ۳. مشخصات گروه خبره مشارکت داده شده در این تحقیق

ردیف	حوزه اصلی تجربه	مدرک تحصیلی	سابقه فعالیت	تخصص علمی / حرفه ای
۱	فیزیولوژی گیاهان در تنش های محیطی	Ph.D	۱۸ سال	دکتری علوم باغبانی
۲	طراحی اجرایی روف گاردن در تهران	فوق لیسانس	۱۵ سال	مهندس معمار و طراح منظر
۳	زیرساخت های سبز و پایداری شهری	Ph.D	۱۲ سال	متخصص اکولوژی شهری
۴	مدیریت نگهداری و سیستم های آبیاری	لیسانس	۲۰ سال	مجری پروژه های بام سبز
۵	شناسایی گونه های بومی و مقاوم	Ph.D	۱۰ سال	گیاه شناس (رزیدنت مرکز تحقیقات)
۶	قوانین و استانداردهای توسعه فضای سبز	فوق لیسانس	۱۴ سال	کارشناس ارشد فضای سبز شهرداری
۷	ارزیابی بارگذاری و بستر کاشت در بام	فوق لیسانس	۱۶ سال	مهندس عمران (سازه)

• تحلیل سلسله مراتبی (AHP) و وزن دهی نهایی

پس از نهایی شدن شاخص ها در مرحله دلفی فازی، اولویت بندی آن ها با استفاده از فرآیند تحلیل سلسله مراتبی (AHP) انجام گرفت. در این مرحله، ماتریس مقایسات زوجی تشکیل شد و از خبرگان خواسته شد تا اهمیت شاخص ها را نسبت به یکدیگر در مقیاس ۱ تا ۹ تعیین کنند. پس از تشکیل ماتریس های مقایسات زوجی توسط خبرگان، به منظور شفاف سازی چگونگی محاسبه ی وزن ها، نمونه ای از ماتریس تجمیع شده ی معیارهای اصلی در جدول ۴ ارائه شده است. در این ماتریس، هر عدد نشان دهنده ی اهمیت نسبی معیار سطر نسبت به معیار ستون بر اساس مقیاس نه گانه است. برای نمونه، مقدار ۳ در محل تقاطع ویژگی های اکولوژیک (سطر) و زیبایی شناسی و بصری (ستون) بیانگر آن است که از دیدگاه خبرگان، معیار اکولوژیک به طور نسبتاً قوی تری (با درجه ۳) نسبت به معیار زیبایی شناسی اهمیت دارد. مقادیر کمتر از یک (مانند ۱/۳ و ۱/۲) نیز نشان دهنده ی اهمیت بیشتر معیار ستون نسبت به معیار سطر است. نرخ ناسازگاری این ماتریس خاص برابر با ۰.۰۱۲ محاسبه شد که در محدوده ی مجاز (کمتر از ۰.۱) قرار دارد. لازم به ذکر است که نرخ ناسازگاری نهایی ۰.۰۰۶ گزارش شده در بخش نتایج، میانگین موزون نرخ های ناسازگاری تمامی ماتریس های مقایسات زوجی (شامل معیارهای اصلی و زیرمعیارها) است.

جدول ۴: نمونه ای از ماتریس مقایسات زوجی معیارهای اصلی (تجمیع نظرات خبرگان)

معیارها	ویژگی های اکولوژیک	پایداری و زیستی	زیبایی شناسی و بصری	اقتصادی
ویژگی های اکولوژیک	۱	۲	۳	۴
پایداری و زیستی	۱/۲	۱	۲	۲
زیبایی شناسی و بصری	۱/۳	۱/۲	۱	۲
اقتصادی	۱/۴	۱/۲	۱/۲	۱

در نهایت وزن های استخراج شده برای معیارهایی نظیر نیاز آبی کم و مقاومت به گرما، نشان دهنده اولویت بالای پایداری اکولوژیکی در محیط های شهری تهران است. با محاسبه نرخ ناسازگاری و اطمینان از مقدار کمتر از ۰.۱، نتایج حاصل از پرسشنامه ها به عنوان مبنای رتبه بندی گونه های گیاهی انتخاب گردید. این گونه ها در جدول ۵ ارائه شده اند. این رویکرد ترکیبی (Fuzzy Delphi – AHP) دقت مدل پیشنهادی را برای طراحان و مدیران شهری تضمین می کند.

جدول ۵. گونه‌های گیاهی مورد مطالعه در مدل تصمیم‌گیری

ردیف	نام علمی (Scientific Name)	وضعیت مقاومت اولیه	نام فارسی گونه
۱	Festuca ovina	مقاوم به خشکی	فستوکا
۲	Lavandula angustifolia	گیاه چندساله مقاوم	اسطوخودوس
۳	Rosmarinus officinalis	مقاوم به گرما و آفتاب	رزماری
۴	Lippia nodiflora	پوششی جایگزین چمن	فیلا
۵	Pennisetum sp.	گندمیان زبیتی مقاوم	پنیستوم
۶	Pittosporum sp.	درختچه همیشه سبز	میخک هندی
۷	Ligustrum japonicum	مقاوم در محیط شهری	یاس هلندی
۸	Sedum sp.	بسیار مقاوم به کم‌آبی	سدوم‌ها
۹	Rhododendron simsii	حساس	آزالیا
۱۰	Chamaecyparis lawsoniana	سوزنی‌برگ تزیننی	سرو لاوسن

۳- نتایج

• نتایج غربالگری شاخص‌ها به روش دلفی فازی

در مرحله نخست، پس از توزیع پرسشنامه‌ها میان پانل خبرگان، شاخص‌های مستخرج از مبانی نظری مورد ارزیابی قرار گرفتند. نظرات کیفی خبرگان به اعداد فازی مثلثی تبدیل شد تا ابهام موجود در پاسخ‌ها مدیریت شود. میانگین فازی نظرات برای هر شاخص محاسبه گردید و با استفاده از روش مرکز ثقل، این مقادیر به اعداد قطعی (Crisp) تبدیل شدند. نتایج نشان داد که تمامی شاخص‌های اصلی از جمله نیاز آبی، مقاومت به دما و هزینه نگهداری، امتیازی بالاتر از حد آستانه (۰/۶) کسب کرده و وارد مرحله نهایی شدند. این فرآیند اطمینان داد که معیارهای ارزیابی کاملاً با شرایط اقلیمی و اقتصادی شهر تهران همسو هستند.

• وزن‌دهی معیارها با استفاده از AHP

پس از تایید نهایی شاخص‌ها در مرحله دلفی فازی، ماتریس مقایسات زوجی جهت تعیین وزن هر معیار در فرآیند انتخاب گونه‌ها تشکیل شد (جدول ۶). تحلیل‌های انجام شده نشان داد که معیار نیاز آبی کم با بیشترین وزن، حیاتی‌ترین فاکتور برای موفقیت بام‌های سبز در تهران محسوب می‌شود. پس از آن، مقاومت به نوسانات دمایی و هزینه نگهداری در رتبه‌های بعدی اهمیت قرار گرفتند. نرخ ناسازگاری در این محاسبات معادل ۰/۶ به دست آمد که نشان‌دهنده پایداری و اعتبار بالای نظرات متخصصان در وزن‌دهی به شاخص‌ها است.

جدول ۶. وزن نهایی معیارهای اصلی استخراج شده از تحلیل سلسله‌مراتبی

رتبه اهمیت	وزن قطعی (Crisp)	وزن فازی (میانگین)	معیار اصلی
۱	۰/۴۵	۰/۷۵ ، ۰/۸۵ ، ۰/۹۵	ویژگی‌های اکولوژیک (نیاز آبی و مقاومت)
۲	۰/۲۵	۰/۷۵ ، ۰/۶۵ ، ۰/۵۵	پایداری و زیستی (طول عمر و رشد)
۳	۰/۱۸	۰/۶۰ ، ۰/۵۰ ، ۰/۴۰	زیبایی‌شناسی و بصری
۴	۰/۱۲	۰/۵۰ ، ۰/۴۰ ، ۰/۳۰	اقتصادی (خرید و نگهداری)

• ارزیابی عملکرد گونه‌های گیاهی

در این بخش، هر یک از ۱۰ گونه منتخب بر اساس معیارهای وزن‌دهی شده مورد سنجش قرار گرفتند. داده‌های حاصل از پرسشنامه‌های تخصصی نشان داد که گیاهان پوششی و گندمیان به دلیل ساختار فیزیولوژیک خود، انطباق بیشتری با شاخص‌های برتر دارند. در مقابل، گونه‌های درختی و درختچه‌ای با وجود ارزش زیبایی‌شناسی بالا، به دلیل نیاز به بستر کاشت عمیق‌تر و آبیاری بیشتر، امتیازات کمتری در بخش پایداری کسب کردند. این ارزیابی مبنای رتبه‌بندی نهایی در مدل تصمیم‌گیری چندمعیاره قرار گرفت. نتایج این مرحله از تحقیق در جدول ۷ ارائه شده است.

جدول ۷. رتبه‌بندی نهایی گونه‌های گیاهی بر اساس ادغام امتیازات دلفی فازی و AHP

رتبه اولویت	وضعیت پذیرش در مدل	امتیاز نهایی	نام گونه گیاهی
۱	اولویت اول	۰/۹۴۲	فستوکا
۲	اولویت دوم	۰/۸۸۵	اسطوخودوس
۳	اولویت سوم	۰/۸۲۰	رزماری
۴	قابل قبول	۰/۷۵۶	فیلا
۵	قابل قبول	۰/۶۹۰	پنیسیتوم
۶	متوسط	۰/۶۱۲	میخک هندی
۷	نیاز به مراقبت	۰/۵۴۵	یاس هلندی
۸	محدودیت در کاربرد	۰/۴۸۰	سدوم‌ها
۹	حساس به شرایط اقلیمی	۰/۳۹۰	آزالیا
۱۰	کمترین اولویت	۰/۲۸۵	سرو لاوسن

مطابق با نتایج حاصل از محاسبات، گونه فستوکا (*Festuca ovina*) با کسب بالاترین امتیاز نهایی، به عنوان مناسب‌ترین گزینه برای روف‌گاردن‌های تهران شناسایی شد. این گیاه به دلیل مقاومت فوق‌العاده در برابر خشکی و توانایی بقا در خاک‌های فقیر، امتیاز کامل را در معیارهای اکولوژیک به دست آورد. همچنین هزینه بسیار پایین نگهداری و سرعت پوشش‌دهی بالا، فستوکا را در جایگاه اول اولویت‌بندی قرار داد. کارشناسان معتقدند این گونه می‌تواند به عنوان یک بستر سبز پایدار در تمام فصول سال عملکرد مثبتی داشته باشد. گونه‌های اسطوخودوس و رزماری به ترتیب در رتبه‌های دوم و سوم جدول اولویت قرار گرفتند. این گیاهان علاوه بر نیاز آبی متوسط به پایین، به دلیل تولید اسانس‌های گیاهی، مقاومت بالایی در برابر آفات فضای سبز شهری نشان دادند. امتیاز بالای این دو گونه در شاخص زیبایی‌شناسی و دوام طولانی‌مدت، آن‌ها را به گزینه‌هایی ایده‌آل برای ترکیب با گیاهان پوششی تبدیل کرده است. در تحلیل AHP، این گونه‌ها توازن بسیار خوبی میان هزینه‌های اقتصادی و جذابیت‌های بصری ایجاد کردند. در رتبه‌های میانی جدول، گونه‌هایی نظیر فیلا، پنیسیتوم، میخک هندی و یاس هلندی قرار گرفتند که امتیازاتی نزدیک به یکدیگر کسب کردند. گیاه فیلا به دلیل توانایی جایگزینی با چمن و نیاز آبی نسبتاً پایین، امتیاز بالایی در پایداری داشت، اما به دلیل حساسیت نسبی به سرمای شدید زمستان تهران، در رتبه‌ای پایین‌تر از فستوکا قرار گرفت. یاس هلندی نیز علی‌رغم جذابیت بصری بسیار زیاد، به دلیل نیاز به پایش مداوم سیستم آبیاری و هرس سالیانه، در رده هفتم رتبه‌بندی متخصصان جای گرفت. گونه‌های سدوم و آزالیا در رده‌های هشتم و نهم جدول قرار گرفتند که نشان‌دهنده محدودیت‌های خاص آن‌ها در کاربرد گسترده است. سدوم‌ها با وجود مقاومت بالا، به دلیل عدم ایجاد حجم سبز کافی و تنوع بصری محدود در مقایسه با گونه‌های بالادستی، امتیاز کمتری دریافت کردند. گیاه آزالیا نیز به دلیل نیاز به خاک اسیدی و حساسیت شدید به تابش مستقیم آفتاب تابستان تهران، تنها در بخش‌های سایه‌گیر بام قابل توصیه است. این عوامل باعث شد تا وزن نهایی این گونه‌ها در مدل AHP نسبت به گیاهان مقاومی چون رزماری به شدت کاهش یابد. در نهایت، گونه سرو لاوسن با کسب کمترین امتیاز در میان ۱۰ گونه مورد مطالعه، در انتهای جدول اولویت‌بندی قرار گرفت. این نتیجه به دلیل نیاز آبی بالاتر این سوزنی‌برگ در ماه‌های گرم سال و همچنین وزن سنگین توده ریشه‌ای آن است که محدودیت‌های سازه‌ای برای بام ایجاد می‌کند. اگرچه این گیاه از نظر زیبایی امتیاز مناسبی دارد، اما در شاخص‌های پایداری و نگهداری که وزن بیشتری در مدل تحقیق داشتند، ضعیف عمل کرده است. بدین ترتیب، اولویت‌بندی نهایی پژوهش به ترتیب جدول زیر برای پیاده‌سازی در بام‌های سبز تهران پیشنهاد می‌گردد.

• تحلیل حساسیت

به منظور ارزیابی پایداری رتبه‌بندی نهایی، تحلیل حساسیت بر روی وزن معیار ویژگی‌های اکولوژیک به عنوان تأثیرگذارترین معیار (با وزن ۰/۴۵) انجام شد. در این تحلیل، وزن این معیار در دو سناریوی ۲۰٪ (کاهش به ۰/۳۶) و ۲۰٪ (افزایش به ۰/۵۴) تغییر داده شد و وزن سایر معیارها به طور متناسب اصلاح گردید. نتایج نشان داد که در هر دو سناریو، رتبه‌بندی سه گونه برتر (فستوکا، اسطوخودوس و رزماری) کاملاً پایدار باقی می‌ماند. این یافته نشان‌دهنده استحکام بالای مدل ارائه شده است و تأیید می‌کند که نتایج پژوهش به شدت وابسته به یک وزن خاص نیست و در مواجهه با تغییرات احتمالی در نظرات خبرگان، از اعتبار کافی برخوردار است.

۴-بحث

نتایج این پژوهش نشان داد که اولویت‌بندی شاخص‌ها در مدل دلفی فازی، به شدت تحت تأثیر چالش‌های هیدرولوژیک و حرارتی کلان‌شهر تهران قرار دارد. وزن بالای اختصاص یافته به معیار نیاز آبی کم در تحلیل AHP، بازتاب‌دهنده واقعیت بحران آب در اقلیم نیمه‌خشک این منطقه است. متخصصان با آگاهی از محدودیت منابع آبی و هزینه‌های بالای آبیاری در ارتفاع، پایداری اکولوژیک را بر جذابیت‌های آبی بصری مقدم دانسته‌اند. این یافته با نتایج پژوهش‌های پیشین که بر ضرورت استفاده از گیاهان کم‌نیاز در مناطق مدیترانه‌ای تأکید داشتند، هم‌سویی کاملی دارد. در واقع، دلفی فازی توانست با دقت بالایی ابهامات موجود در انتخاب گونه‌های سازگار را حذف نماید. دلیل دستیابی گونه فستوکا به رتبه نخست اولویت‌بندی، ویژگی‌های فیزیولوژیک منحصر به فرد این گیاه در مواجهه با شرایط سخت محیطی است. فستوکا به دلیل ساختار ریشه‌ای متراکم و نیاز بسیار اندک به خاک غنی، کمترین بار مرده را به سازه بام تحمیل می‌کند که این موضوع در تحلیل‌های مهندسی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. متخصصان در این پژوهش خاطرنشان کردند که پایداری رنگ در فصول مختلف و مقاومت به بادهای شدید ارتفاعات، فستوکا را به یک گزینه استراتژیک تبدیل کرده است. این نتیجه نشان می‌دهد که برای بام‌های سبز گسترده، گیاهان پوششی خانواده گندمیان همچنان کارآمدترین انتخاب محسوب می‌شوند. قرارگیری اسطوخودوس و رزماری در رتبه‌های دوم و سوم، نشان‌دهنده تمایل متخصصان به بهره‌گیری از گونه‌های چندمنظوره در طراحی فضای سبز است. این گیاهان نه تنها در برابر تنش‌های گرمایی تهران بسیار مقاوم هستند، بلکه به دلیل خاصیت دفع‌کنندگی طبیعی آفات، هزینه‌های نگهداری شیمیایی را به شدت کاهش می‌دهند. از منظر اقتصادی، پایین بودن نرخ جایگزینی این گونه‌ها به دلیل طول عمر بالا، وزن قابل توجهی در مدل AHP به آن‌ها اختصاص داده است. این یافته تأیید می‌کند که گیاهان معطر مدیترانه‌ای می‌توانند توازن پایدار میان زیبایی‌شناسی و تاب‌آوری اکولوژیک در بام‌های شهری ایجاد کنند. تحلیل نتایج مربوط به گونه‌هایی مانند یاس هلندی و میخک هندی نشان داد که علی‌رغم محبوبیت این گیاهان در فضاهای سبز هم‌سطح، استفاده از آن‌ها در بام با محدودیت‌های جدی روبروست. این گونه‌ها به دلیل نیاز به عمق بستر کاشت و حساسیت به خشکی هوا، امتیازات کمتری در شاخص‌های پایداری کسب کردند. متخصصان در راندهای دلفی فازی تأکید داشتند که تبخیر و تعرق در ارتفاع بسیار بالاتر از سطح زمین است و همین امر نگهداری یاس هلندی را پرهزینه می‌کند. بنابراین، استفاده از این گونه‌ها تنها در نقاط خاصی از بام که دارای میکروکلیمای محافظت شده هستند، پیشنهاد می‌گردد. نکته جالب توجه در این پژوهش، رتبه متوسط سدوم‌ها برخلاف باورهای رایج در ادبیات جهانی بام سبز بود. در حالی که در بسیاری از کشورهای اروپایی سدوم گزینه اول است، در تهران به دلیل تابش شدید فرابنفش و گرمای بالای ۴۰ درجه، برخی زیرگونه‌های سدوم دچار سوختگی می‌شوند. امتیاز پایین‌تر سدوم در مقایسه با فستوکا در این تحقیق، ناشی از عدم توانایی این گیاه در کاهش اثر جزیره حرارتی به اندازه گیاهان با حجم سبز بیشتر است. خبرگان بر این باورند که سدوم‌ها باید به عنوان مکمل و نه گونه غالب در پروژه‌های شهر تهران مورد استفاده قرار گیرند. افت شدید امتیاز گونه‌هایی مانند آزالیا و سرو لاوسن در انتهای جدول، ریشه در ناسازگاری فیزیولوژیک آن‌ها با اکوسیستم مصنوعی بام دارد. آزالیا به دلیل نیاز به رطوبت بالای خاک و اتمسفر، در محیط خشک و بادگیر پشت‌بام‌های تهران به سرعت دچار زوال می‌گردد. همچنین، سرو لاوسن با وجود ایجاد حصار بصری مناسب، در درازمدت به دلیل رشد ریشه و ریسک واژگونی در برابر باد، هزینه‌های ایمنی سازه را افزایش می‌دهد. این نتایج هشدار می‌دهند که نباید صرفاً بر اساس جنبه‌های تزئینی و کاتالوگ‌های فروشگاه‌ها، اقدام به انتخاب گونه برای محیط‌های حساسی چون بام نمود. بهره‌گیری از رویکرد ترکیبی در این مطالعه، دقت تصمیم‌گیری را نسبت به مطالعات تک‌بعدی گذشته به طور معناداری ارتقا بخشیده است. روش دلفی فازی به خوبی توانست ذهنیت‌های متفاوت متخصصان را با استفاده از توابع عضویت فازی یکپارچه کرده و از حذف زود هنگام شاخص‌های کلیدی جلوگیری کند. فرآیند AHP نیز با ایجاد یک ساختار سلسله‌مراتبی، وزن‌های دقیقی به معیارهای متضاد اختصاص داد که منجر به رتبه‌بندی منطقی گونه‌ها شد. این مدل تصمیم‌گیری می‌تواند به عنوان یک ابزار استاندارد برای ارزیابی گونه‌های جدیدی که به بازار فضای سبز تهران وارد می‌شوند، مورد استفاده قرار گیرد. بر اساس یافته‌های این بخش، پیشنهاد می‌گردد طراحان بام سبز در تهران اولویت کاشت را به گیاهان پوششی مقاوم مانند فستوکا و فیلا و گیاهان معطر (رزماری و اسطوخودوس) اختصاص دهند. ایجاد تنوع زیستی با ترکیب رتبه‌های برتر جدول، علاوه بر افزایش تاب‌آوری سیستم، می‌تواند به کاهش هزینه‌های جاری نگهداری و مصرف آب کمک کند. همچنین به مدیران شهری توصیه می‌شود ضوابط حمایتی خود را بر اساس گونه‌های بومی و کم‌نیاز تدوین کنند تا پایداری این زیرساخت‌های سبز در درازمدت تضمین شود. این پژوهش گامی موثر در جهت علمی‌سازی انتخاب پوشش گیاهی و جلوگیری از هدررفت منابع در پروژه‌های معماری سبز کلان‌شهر تهران است.

۵- نتیجه‌گیری

• دستاوردهای نظری پژوهش

پژوهش حاضر با تدوین یک مدل تصمیم‌گیری چندمعیاره‌ی بومی برای انتخاب گونه‌های گیاهی بام سبز در تهران، به چندین دستاورد نظری انجامیده است: نخست، نشان داد که اولویت‌بندی معیارها در اقلیم‌های نیمه‌خشک، تفاوت معناداری با مناطق معتدل یا مرطوب دارد؛ به گونه‌ای که معیار نیاز آبی کم با وزن ۰.۴۵، بر تمامی معیارهای دیگر (از جمله زیبایی‌شناسی با وزن ۰.۱۸) برتری دارد. دوم، این پژوهش با ترکیب روش‌های دلفی فازی و AHP، نشان داد که می‌توان ابهامات ذهنی خبرگان را در فرآیند انتخاب گونه، به صورت نظام‌مند کمی کرد و از تصمیم‌گیری سلیقه‌ای جلوگیری نمود. سوم، با ارائه‌ی چارچوب مفهومی مبتنی بر بوم‌گرایی تطبیقی، خلأ نظری موجود در ادبیات داخلی درباره‌ی ارتباط میان ویژگی‌های اقلیمی تهران و معیارهای انتخاب گیاه را پر کرده است.

• پیامدهای کاربردی و اجرایی

از منظر عملیاتی، رتبه‌بندی نهایی ۱۰ گونه (جدول ۶) یک راهنمای عینی برای طراحان منظر، مشاوران بام سبز و مدیران فضای سبز شهرداری تهران فراهم می‌آورد. بر اساس نتایج، استفاده از فستوکا به عنوان گونه‌ی پایه در بام‌های گسترده، و ترکیب آن با اسطوخودوس و رزماری در نقاط دارای دسترسی بصری بیشتر، می‌تواند ضمن کاهش مصرف آب، هزینه‌های نگهداری بلندمدت را نیز به طور قابل توجهی کاهش دهد. در مقابل، اجتناب از گونه‌های حساسی چون آزالیا و سرو لاوسن در پروژه‌های عمومی، از ریسک خشک‌شدگی و تحمیل هزینه‌های بازکاشت جلوگیری خواهد کرد. این مدل همچنین قابلیت تعمیم به سایر شهرهای ایران با اقلیم مشابه (مانند اصفهان، شیراز و کرج) را دارد، مشروط به آنکه وزن‌دهی معیارها با مشارکت خبرگان همان منطقه به‌روزرسانی شود.

• محدودیت‌های پژوهش

با وجود تلاش برای ارائه‌ی یک مدل جامع، این پژوهش با محدودیت‌هایی همراه است که باید در تفسیر نتایج مدنظر قرار گیرد: اول، تعداد خبرگان مشارکت‌کننده (۷ نفر) اگرچه از تنوع تخصصی مناسبی برخوردار بود، اما برای تعمیم‌پذیری آماری کامل، حجم نمونه‌ی کوچکی محسوب می‌شود. دوم، تعداد گونه‌های ارزیابی‌شده به ۱۰ گونه‌ی رایج در پروژه‌های تهران محدود بود و گونه‌های بومی کمترشناخته‌شده‌ی دیگر (که ممکن است عملکرد بهتری داشته باشند) در این مطالعه گنجانده نشدند. سوم، پژوهش حاضر بر اساس نظرات خبرگان و داده‌های موجود طراحی شد، اما پایش بلندمدت (چندساله) از رفتار فیزیولوژیک این گونه‌ها در شرایط واقعی بام تهران انجام نشده است؛ عواملی مانند تأثیر ترکیبات مختلف بستر کاشت، کیفیت آب آبیاری و آلاینده‌های هوا بر عملکرد گیاهان در این مطالعه لحاظ نشده است.

• پیشنهادها برای پژوهش‌های آینده

بر اساس یافته‌ها و محدودیت‌های این پژوهش، چندین مسیر برای تحقیقات آتی قابل تعریف است: (۱) بررسی تجربی تأثیر ترکیبات مختلف بستر کاشت (نسبت مواد آلی، پرلیت، ورمیکولیت و زئولیت) بر رشد و ماندگاری گونه‌های برتر معرفی‌شده؛ (۲) مطالعه‌ی بلندمدت رفتار گیاهان در شرایط تغییر اقلیم و خشکسالی‌های دوره‌ای، به‌ویژه با توجه به سناریوهای کاهش بارندگی در نیم‌قرن آینده؛ (۳) پژوهش‌های میان‌رشته‌ای برای سنجش رضایت‌مندی روان‌شناختی ساکنان از گونه‌های مختلف، تا بتوان تعادل دقیق‌تری میان عملکرد اکولوژیک و پذیرش اجتماعی برقرار کرد؛ (۴) توسعه‌ی نرم‌افزار تصمیم‌یار مبتنی بر مدل ارائه‌شده که به طراحان امکان دهد با وارد کردن مشخصات اقلیمی و سازه‌ای هر پروژه، پیشنهاد بهینه‌ی ترکیب گونه‌ها را دریافت کنند.

- Abass, F.; Ismail, L.H.; Wahab, I.A.; Elgadi, A.A (2020). A review of green roof: Definition, history, evolution and functions. In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering; IOP Publishing: Bristol, UK.; Volume 713, p. 012048.
- Aguiar, A. C., Robinson, S. A., & French, K. (2019). Friends with benefits: The effects of vegetative shading on plant survival in a green roof environment. PLoS ONE, 14, e0225078.
- Ampim, P. A., Sloan, J. J., Cabrera, R. I., Harp, D. A., and Jaber, F. H. (2010). Green roof growing substrates: Types, ingredients, composition and properties. J. Environ. Hortic. 28, 244–252.
- Benvenuti, S., Bacci, D., (2010). Initial agronomic performances of Mediterranean xerophytes in simulated dry green roofs. Urban Ecosyst. 13 (3), 349–363.
- Bevilacqua, P. (2021). The effectiveness of green roofs in reducing building energy consumptions across different climates: A summary of literature results. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 151, 111523.
- Boussetot, J., Russell, V., Tolderlund, L., Celik, S., Retzlaff, B., Morgan, S., et al. (2020). Green roof research in north America: A recent history and future strategies. J. Living Arch.
- Calheiros, C. S., & Pereira, S. I. (2023). Resilience of green roofs to climate change. In Adapting the Built Environment for Climate Change. Elsevier (pp. 273–296)..
- Coma, J., Pérez, G., & Cabeza, L. F. (2018). Green Roofs to Enhance the Thermal Performance of Buildings and Outdoor Comfort. In G. Pérez & K. Perini (Eds.), Nature Based Strategies for Urban and Building Sustainability. Butterworth-Heinemann (pp. 109–117).
- De Palma, N., Yendo, A. C. A., Vilasboa, J., Chacon, D. S., Fett-Neto, A. G. (2023). Biochemical responses in leaf tissues of alkaloid producing *Psychotria brachyceras* under multiple stresses. J. Plant Res., 136, 397–412.
- Demuzere, M., Faehnle, M., Orru, K., Olazabal, E., Geneletti, D., Heidrich, O., Orru, H., Feilu, E., Bhawe, A., & Mittal, N. (2014). Evidence on the contribution of green urban infrastructure to climate change mitigation and adaptation. In Understanding Cities: Advances in Integrated Assessment of Urban Sustainability. Centre for Earth Systems Engineering Research (CESER), Newcastle University. (pp. 140–165).
- Dirks, I., Raviv, B., Shefel, O., Hill, A., Eppel, A., Aidoo, M. K., Hoefgen, B., Rapaport, T., Gil, H., Geta, E., et al. (2016). Green roofs: What can we learn from desert plants? Isr. J. Ecol. Evol., 62, 58–67
- Du, J., et al. (2010). Factors affecting plant survival on extensive green roofs in arid and semi-arid climates. Journal of Arid Environments, 74(2), 293–298.
- Dvorak B, Volder A. (2010) Green roof vegetation for North American eco regions: a literature review. Landsc Urban Plan; 96:197–213.
- Esfahani, R. E., Paço, T. A., Martins, D., & Arsénio, P. (2022). Increasing the resistance of Mediterranean extensive green roofs by using native plants from old roofs and walls. Ecological Engineering, 178, 106576
- Eskandari, S., Poursafavi, F., and Zahedi, M. (2016). Green Roof or Roof Garden? A Look at Recent Experiences in Tehran. Quarterly Journal of Landscape Architecture, 30(31), Summer 2016. [In Persian]
- Farrell C, Mitchell RE, Szota C, Rayner JP, Williams NSG. (2012) Green roofs for hot and dry climates: interacting effects of plant water use, succulence and substrate. Ecol En ;49:270–6.
- Francis, R. A., & Lorimer, J. (2011). Urban reconciliation ecology: The potential of living roofs and walls. Journal of Environmental Management, 92(6), 1429–1437.
- Gabrych M, Kotze DJ, Lehvavirta S. (2016) Substrate depth and roof age strongly affect plant abundances on sedum-moss and meadow green roofs in Helsinki. Finl Ecol Eng; 86:95–104.
- Habibi, A., Jahantigh, F.F. and Sarafrazi, A. (2015) ‘Fuzzy Delphi Technique for Forecasting and Screening Items’, Asian Journal of Research in Business Economics and Management, 5(2), p. 130. Available at: <https://doi.org/10.5958/2249-7307.2015.00036.5>.
- Hamar-Farkas, D., Kisvarga, S., Ördögh, M., Orlóci, L., Honfi, P., & Kohut, I. (2024). Comparison of *Festuca glauca* ‘Uchte’ and *Festuca amethystina* ‘Walberla’ varieties in a simulated extensive roof garden environment. Plants, 13, 2216.
- Jaffal, I., Ouldboukhite, S.-E., and Belarbi, R. (2012). A comprehensive study of the impact of green roofs on building energy performance. Renew. energy 43, 157–164.
- Kader, S., Chadalavada, S., Jaufer, L., Spalevic, V., & Dudic, B. (2022). Green roof substrates—A literature review. Frontiers in Built Environment

- Knapp, S., Schmauck, S., & Zehnsdorf, A. (2019). Biodiversity impact of green roofs and constructed wetlands as progressive eco-technologies in urban areas. *Sustainability*, 11(20), 5846.
- Leong, W. Y. (2025). Innovative green roofs and vertical gardens in Malaysian architecture. In *Proceedings of the 10th International Conference on Applying New Technology in Green Buildings*
- Leotta, L., Toscano, S., & Romano, D. (2023). Which Plant Species for Green Roofs in the Mediterranean Environment? *Plants*, 12, 3985
- Li, W. C., and Yeung, K. K. A. (2014). A comprehensive study of green roof performance from environmental perspective.
- Liberalesso, T., Oliveira Cruz, C., Matos Silva, C., & Manso, M. (2020). Green infrastructure and public policies: An international review of green roofs and green walls incentives. *Land Use Policy*, 96, 104693.
- Liu, H.; Kong, F.; Yin, H.; Middel, A.; Zheng, X.; Huang, J.; Xu, H.; Wang, D.; Wen, Z. (2021). Impacts of Green Roofs on Water, Temperature, and Air Quality: A Bibliometric Review. *Build. Environ.* 196, 107794.
- Mayrand, F., & Clergeau, P. (2018). Green roofs and green walls for biodiversity conservation: A contribution to urban connectivity? *Sustainability*, 10(4), 985.
- Mobasher M. (2014) Green roofs-construction and functional requirements for four buildings on the IST campus;
- Muratet, A., Barra, M., Hardion, L., & Chiron, F. (2024). Origins and drivers of roof plant assemblages: Designing green roofs for biodiversity conservation. *Urban Forestry & Urban Greening*, 94, 128247.
- Ocampo, L., et al. (2018). Sustainable ecotourism indicators with fuzzy Delphi method – A Philippine perspective *Ecological Indicators*, 93, pp. 874–888. Available at: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.05.060>
- Pianella, A., Clarke, R. E., Williams, N. S. G., Chen, Z., & Aye, L. (2016). Steady-state and transient thermal measurements of green roof substrates. *Energy and Buildings*, 131, 123–131.
- Rayner, J. P., Farrell, C., Raynor, K. J., Murphy, S. M., & Williams, N. S. G. (2016). Plant establishment on a green roof under extreme hot and dry conditions: The importance of leaf succulence in plant selection. *Urban Forestry & Urban Greening*, 15, 6–14.
- Refahi, A. H., & Talkhabi, H. (2015). Investigating the effective factors on the reduction of energy consumption in residential buildings with green roofs. *Renewable Energy*. 80, 595– 603.
- Reginaldo, F. P. S., Bueno, P. C. P., De Costa, I. C. M., Araújo, A. R. D., Fett-Neto, A. G., Cavaleiro, A. J., & Giordani, R. B. (2021). Molecular networking discloses the chemical diversity of flavonoids and selaginellins in *Selaginella convoluta*. *Plant Med.*, 87, 113–123.
- Rowe, D.B. (2011). Green roofs as a means of pollution abatement. *Environ. Pollut.* 159, 2100–2110.
- Sadrkhanlou M, Maher A, Alimohammadzadeh K, Jafari M, Bahadori M. (2023).Applying the Delphi Approach to Prioritize Social Factors Affecting the Development of Children Under Six Years. *BMC Public Health*. 29;23(1):1659. doi: 10.1186/s12889-023-16521-x. PMID: 37644469; PMCID: PMC10466685.
- Salman, I. N., Schindler, B., Agra, H., Bawab, O., Friedman-Heiman, A., Kadas, G. J., Seifan, M., & Blaustein, L. (2019). Green roof research towards enhancing urban biodiversity, storm-water retention and air pollution abatement. *CABI Reviews*, 1–14.
- Schweitzer O, Erell E. (2014). Evaluation of the energy performance and irrigation requirements of extensive green roofs in a water-scarce Mediterranean climate. *Energy Build* ;68:25–32.
- Semeraro T, Scarano A, Buccolieri R, Santino A and Aarrevaara E (2021) *J. Land*. 10 p 105
- Shafique, M., Kim, R., & Rafiq, M. (2018). Green roof benefits, opportunities and challenges – A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 90, 757–773.
- Stovin, V. (2010). The potential of green roofs to manage urban stormwater. *Water Environment Journal*, 24(3), 192–199.
- Susca, T., Gaffin, S. R., & Dell’osso, G. R. (2011). Positive effects of vegetation: urban heat island and green roofs. *Environmental Pollution (Barking, Essex : 1987)*, 159(8–9), 2119– 26.
- Taghavi, L. (2014). The role of green roofs and walls in sustainable urban development, *Sustainable Development and Environment*, Vol. 1, pp. 36-20[In Persian]
- Thuring, C.E., and Dunnett, N. (2014). Vegetation composition of old extensive green roofs (from 1980s Germany). *Ecol. Process.* 3, 4–11
- Vahdati Mashhadian, N., Tehranifar, A., and Kazemi, F. (2014). Evaluation of the resistance of some plant species to cold and drought for use in extensive green roofs in the climatic conditions of Mashhad. *Quarterly Journal of Environmental Sciences*, Volume 14(4), 29-44. [In Persian]

- Van Mechelen, C., Dutoit, T., Kattge, J., Hermy, M., 2014. Plant trait analysis delivers an extensive list of potential green roof species for Mediterranean France. *Ecol. Eng.* 67, 48–59.
- Vestrella, A., Savé, R., Biel, C., 2015. An experimental study in simulated greenroo fin Mediterranean climate. *J. Agric. Sci.* 7 (4), 95.
- Vijayaraghavan K, Joshi UM. (2014) Can green roof act as a sink for contaminants? A methodological study to evaluate runoff quality from green roofs. *Environ Pollut* ;194:121–9.
- Vijayaraghavan, K. (2016). Green roofs: A critical review on the role of components, benefits, limitations and trends. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 57, 740–752.
- Xiao, M., Lin, Y., Han, J., & Zhang, G. (2014). Plant material for green roof: A review of green roof research and development in China. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 40, 633–648
- Yang, H. (2012). Research on the selection of roof plants and plant medium in Beijing. Beijing: Beijing University of Forestry Press.
- Yin, L., & Li, S. (2006). The selection of growing media and the establishment of planting mode for roof greening. *Landscape Architecture*, 4, 46–49.
- Zhang X, Shen L, Wu Y. (2011) Green strategy for gaining competitive advantage in housing development: a China study. *J Clean Prod*; 19:157–67.
- Zhang, H., Lu, S., Wu, J., Jiang, Y., Lu, Y., Zhao, H., 2014. Effect of substrate depth on 18 non-succulent herbaceous perennials for extensive green roofs in a region with a dry spring. *Ecol. Eng.* 71, 490–500.
- Zhang, Y., Wang, Z., He, Z., Li, J., Mai, G., Lin, J., Wei, C., & Yu, W. (2024). BB-GeoGPT: A framework for learning a large language model for geographic information science. *Information Processing & Management*, 61, 103808

– آذر، ع. و فرجی، ح. (۱۳۹۵). علم مدیریت فازی (ویرایش پنجم). تهران: مؤسسه کتاب مهربان نشر. (۳۰۸ صفحه)