

Uncertainty Analysis of Urban Green Space Water Requirement Estimation Using the LCM-WUCOLS Method (Case Study: Park-e-Shahr Tehran)

Abstract

Water scarcity in arid and semi-arid metropolitan areas has increased the need for accurate estimation of urban green-space water requirements and improved irrigation efficiency. This study assessed the uncertainty of the LCM-WUCOLS approach and evaluated its applicability under Tehran conditions by comparing its estimates with those obtained from i-Tree Eco for Plot 48 of Tehran City Park. Annual ET_0 , calculated from Hyderabad Station data using CROPWAT, was 1,286 mm. To assign WUCOLS species factors, the climatic similarity between Tehran and selected California stations was evaluated, and WUCOLS climate region 2 was identified as the most appropriate analogue. Considering the existing vegetation, approximately 98% of the plot area was covered by turf grass, the annual landscape water requirement estimated by LCM-WUCOLS was 1,225 mm, while irrigation efficiency based on applied water was 45.5%. For direct comparison with i-Tree Eco, turf grass was excluded from the analysis. Under this condition, the baseline LCM-WUCOLS estimate was 772 mm yr^{-1} , whereas i-Tree Eco estimated 1,043 mm yr^{-1} . Uncertainty analysis showed that varying the species and density factors within their allowable ranges changed the LCM-WUCOLS estimate from 566 to 1,003 mm yr^{-1} , corresponding to approximately 27% below to 30% above the baseline estimate. The proximity of the upper uncertainty bound to the i-Tree Eco estimate highlights the decisive influence of coefficient selection on model accuracy. The findings emphasize the need for local calibration, improved irrigation scheduling, reduced use of water-intensive vegetation, and field validation before broader application across Tehran.

Keywords: *Irrigation, Xeriscaping, Landscape coefficient, Urban green space, WUCOLS*

Introduction

Urban green spaces provide important ecological and social services, including microclimate regulation, mitigation of the urban heat-island effect, improved air quality and, recreational opportunities, and reduction of surface runoff. Maintaining these functions, however, requires sustained irrigation, which is increasingly challenging in arid and semi-arid metropolitan areas such as Tehran, where water resources are limited. Accurate estimation of landscape water requirements is therefore essential for irrigation scheduling, assessment of supplied water, and identification of opportunities to reduce losses caused by over-irrigation, runoff, evaporation, and deep percolation. These considerations are particularly important where the sustainability of conventional and alternative water supplies is increasingly constrained.

Landscape water demand differs from agricultural crop water demand because urban green spaces commonly contain mixtures of trees, shrubs, groundcovers, and turfgrass with different water-use characteristics, canopy densities, and microclimatic exposures. The Landscape Coefficient Method (LCM) addresses this heterogeneity by adjusting reference evapotranspiration (ET_0) using three multiplicative factors: species (k_s), vegetation density (k_d), and microclimate (k_{mc}). The Water Use Classification of Landscape Species (WUCOLS III), developed for California, is commonly used to assign relative species water-use categories.

Previous studies have shown that LCM-WUCOLS is practical, requires relatively limited input data, and can account for differences among landscape plant species. Applications in Iran and other regions have generally reported acceptable performance for estimating urban landscape water requirements. Nevertheless, their transfer to other environments may therefore introduce uncertainty, particularly because the selection of specific coefficient values within recommended ranges partly depends on expert judgment. Moreover, LCM-WUCOLS does not explicitly represent individual plant characteristics such as age, size, crown dimensions, leaf area, health status, and growth conditions. In contrast, i-Tree Eco

incorporates actual structural attributes of woody vegetation together with meteorological information, providing an independent basis for evaluating LCM-WUCOLS estimates.

The present study was therefore designed to evaluate the applicability and uncertainty of LCM-WUCOLS for estimating urban green-space water requirements under Tehran conditions. Plot 48 of Tehran City Park was selected as the case study because of its diverse vegetation and mixed irrigation system. The specific objectives were to: (1) estimate annual landscape water requirements using LCM-WUCOLS; (2) compare the estimated requirement with the actual amount of irrigation water applied to evaluate irrigation efficiency; (3) independently estimate the water requirement of the non-turf vegetation using the hydrologic module of i-Tree Eco; and (4) quantify the uncertainty associated with plausible variations in the LCM-WUCOLS species and density factors. The central hypothesis was that coefficient selection can substantially influence LCM-WUCOLS.

Method

A quantitative environmental case-study design combining deterministic water-requirement estimation, comparative modeling, field measurements, and scenario-based sensitivity and uncertainty analysis was adopted. The study area was Plot 48 of Tehran City Park, located in the eastern section of the park and covering an area of 4,343 m². The vegetation inventory comprised 997 plants or plant units representing 28 species of trees, shrubs, ornamental plants, and turfgrass. Approximately 98% of the plot area was occupied by turfgrass, while the remaining area consisted mainly of tree basins and rose shrubs.

Annual ET_0 was estimated using meteorological data from Mehrabad Airport Synoptic Station and the CROPWAT/CLIMWAT software environment. The resulting annual ET_0 was 1,286 mm. Because WUCOLS III is organized according to six California climate regions, climatic compatibility between Tehran and California was evaluated before assigning plant species factors. Monthly ET_0 values from 18 representative stations of the California Irrigation Management Information System (CIMIS) were compared with the Mehrabad data. The comparison employed four evaluation criteria: R^2 , NRMSE, NNSE, and mean relative ET_0 difference. Based on the combined performance of these indicators, WUCOLS climate region 2, showed the greatest similarity to the climatic conditions of the Mehrabad reference station and was therefore selected for assigning species water-use factors.

Landscape evapotranspiration under the LCM-WUCOLS approach was calculated as:

$$ET_L = ET_0 \times k_s \times k_d \times k_{mc}$$

where k_s is the species factor, k_d is the vegetation-density factor, and k_{mc} is the microclimate factor. Species factors were assigned from WUCOLS III. Since WUCOLS provides qualitative water-use categories rather than one unique numerical coefficient for each species, the midpoint of the corresponding coefficient range was used in the baseline calculations.

For the existing vegetation, the dominance of turfgrass and its high water-use classification resulted in an area-weighted k_s of 0.794. A density factor of 1.2 was selected because of relatively high vegetation density, short spacing among plants, substantial shading by mature plane trees, and considerable vertical structural diversity. The microclimate factor was set to 1.0 because Plot 48 is located within a park and represents typical urban green-space microclimatic conditions. Using these parameters together with the annual ET_0 of 1,286 mm, the LCM-WUCOLS water requirement was calculated. Total annual applied irrigation water (TWA) was subsequently calculated from measured discharge rates, the number of irrigation devices (bubblers and sprinklers), irrigation duration and annual frequency. Irrigation

efficiency (IE), as defined within the LCM-WUCOLS framework, was calculated as the ratio of ET_L to TWA.

For an independent comparison, the hydrologic model implemented in i-Tree Eco was applied to the tree and shrub vegetation. The model combines meteorological variables with vegetation characteristics such as species, diameter at breast height, plant height, crown characteristics, health status, and leaf area. It estimates potential evapotranspiration (PET), actual evaporation and transpiration, intercepted precipitation, and avoided runoff at an hourly time step and subsequently aggregates the outputs to annual values. Because the i-Tree Eco analysis did not include turfgrass, the turf component was excluded from the corresponding LCM-WUCOLS analysis to direct comparison between the two approaches. Under the baseline non-turf scenario, $k_s = 0.5$, $k_d = 1.2$, and $k_{mc} = 1.0$ were assumed.

Finally, a scenario-based sensitivity and uncertainty analysis was performed for the non-turf condition. k_{mc} remained fixed at 1.0, consistent with the WUCOLS recommendation for park environments. The species factor was varied from 0.4 to 0.6 because most species in Plot 48 were categorized as moderate water users, while the density factor was varied between 1.1 and 1.3 because the vegetation was classified as highly dense. Four combinations of the lower and upper coefficient limits were evaluated in addition to the baseline scenario.

Results

Considering the existing vegetation configuration, including the turfgrass-dominated surface, LCM-WUCOLS estimated an annual landscape water requirement of $1,225 \text{ mm yr}^{-1}$. Total irrigation water applied to the site was approximately $2.69 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$. Consequently, IE, was approximately 45.5%. This result indicates a substantial discrepancy between estimated beneficial water demand and the volume supplied through the existing irrigation program and therefore reveals considerable potential for reducing water use through improved irrigation management.

Under the non-turf condition, the annual ET_0 estimated by LCM-WUCOLS was 772 mm yr^{-1} while i-Tree Eco hydrologic model estimated total annual potential evapotranspiration of approximately $1,043 \text{ mm yr}^{-1}$. The LCM-WUCOLS baseline estimate was therefore 273 mm lower, corresponding to an approximately 26% lower estimate than i-Tree Eco. The uncertainty analysis demonstrated that coefficient selection constituted an important source of variability in the LCM-WUCOLS calculations. When k_s and k_d were simultaneously assigned their lower values of 0.4 and 1.1, respectively, estimated annual water demand decreased to 566 mm yr^{-1} , approximately 27% below the baseline. The maximum estimate occurred when both coefficients were set at their upper limits ($k_s = 0.6$ and $k_d = 1.3$), resulting in $1,003 \text{ mm yr}^{-1}$, or approximately 30% above the baseline value. Thus, variations in coefficient selection within the recommended WUCOLS ranges produced a total estimation interval of 566–1,003 mm yr^{-1} .

A particularly important observation was that the upper LCM-WUCOLS estimate of $1,003 \text{ mm yr}^{-1}$ approached the i-Tree Eco estimate of $1,043 \text{ mm yr}^{-1}$. This convergence suggests that the discrepancy between the two approaches cannot necessarily be attributed only to a fundamental difference between the models; rather, the particular values assigned to WUCOLS species and density factors strongly influence the resulting estimate. Therefore, locally appropriate selection and calibration of these parameters may significantly improve agreement with models that incorporate actual vegetation structure and condition.

Conclusions

The findings demonstrate that LCM-WUCOLS is a relatively simple and operationally useful approach for estimating urban landscape water requirements; however, its results are sensitive to the selection of the coefficients. Because WUCOLS was developed under California conditions, direct transfer of its empirical coefficients to Tehran without local evaluation may introduce considerable uncertainty. The baseline non-turf LCM-WUCOLS estimate was substantially lower than the i-Tree Eco estimate, whereas the upper uncertainty scenario yielded a considerably closer value. This result confirms that coefficient selection is not merely a procedural detail but a major determinant of estimated landscape water demand. From a water-management perspective, the estimated IE of 45.5% is especially significant. It indicates considerable potential to reduce applied irrigation water through better management without necessarily compromising the estimated water requirement of the vegetation. Recommended management actions include revising irrigation schedules, improving operation of the existing irrigation system, separating irrigation zones according to the water requirements of different plant groups, and reducing the proportion of turfgrass and other water-intensive vegetation. The present findings therefore support the use of LCM-WUCOLS as a practical estimation framework, while emphasizing that local calibration and field validation are essential prerequisites for its broader application.

ارزیابی عدم قطعیت برآورد نیاز آبی فضای سبز شهری با روش LCM-WUCOLS (مطالعه موردی: پارک شهر تهران)

چکیده

کمبود منابع آب در کلان‌شهرهای مناطق خشک و نیمه‌خشک و کمبود آب در سال‌های اخیر، ضرورت برآورد هرچه دقیق‌تر نیاز آبی فضای سبز و افزایش کارایی سامانه‌های آبیاری را دوچندان کرده است. پژوهش حاضر با هدف ارزیابی عدم قطعیت روش LCM-WUCOLS و بررسی قابلیت کاربرد آن در برآورد نیاز آبی فضای سبز در شرایط شهر تهران، با مقایسه نتایج آن با رویکرد i-Tree Eco در قطعه ۴۸ پارک شهر تهران انجام شد. تبخیر-تعرق مرجع سالانه با استفاده از داده‌های ایستگاه مهرآباد و نرم‌افزار CROPWAT برابر ۱۲۸۶ میلی‌متر برآورد شد. برای تعیین ضرایب گونه‌ای WUCOLS، شباهت اقلیمی تهران با ایستگاه‌های کالیفرنیا بررسی و منطقه اقلیمی شماره ۲ به عنوان مناسب‌ترین منطقه انتخاب شد. با لحاظ پوشش موجود، که حدود ۹۸ درصد مساحت آن را چمن تشکیل می‌دهد، نیاز آبی سالانه با روش LCM-WUCOLS برابر ۱۲۲۵ میلی‌متر و راندمان آبیاری بر پایه آب اعمال‌شده ۴۵/۵ درصد محاسبه شد. برای مقایسه مستقیم با i-Tree Eco، چمن از تحلیل حذف شد؛ در این حالت مقدار پایه روش LCM-WUCOLS برابر ۷۷۲ میلی‌متر بود، در حالی که i-Tree Eco نیاز آبی ۱۰۴۳ میلی‌متر را برآورد کرد. تحلیل عدم قطعیت نشان داد تغییر ضرایب گونه‌ای و تراکم در دامنه‌های مجاز می‌تواند برآورد LCM-WUCOLS را بین ۵۶۶ تا ۱۰۰۳ میلی‌متر تغییر دهد، یعنی حدود ۲۷ درصد کمتر تا ۳۰ درصد بیشتر از حالت پایه. نزدیکی حد بالای این دامنه به نتیجه i-Tree Eco نشان می‌دهد انتخاب ضرایب نقش تعیین‌کننده‌ای در دقت برآورد دارد. نتایج بر ضرورت کالیبراسیون محلی ضرایب، بهبود برنامه آبیاری و کاهش سهم پوشش‌های پرآبر برای مدیریت پایدار آب فضای سبز تهران تأکید دارد. پیش از تعمیم، صحت‌سنجی میدانی در قطعات دیگر نیز ضروری است.

واژه‌های کلیدی: آبیاری، تبخیر-تعرق، ضریب منظر، طبقه‌بندی نیاز آبی، راندمان آبیاری

مقدمه

گسترش شهرنشینی و افزایش تراکم جمعیت، توسعه و نگهداری فضاهای سبز شهری را به یکی از مؤلفه‌های مهم برنامه‌ریزی و مدیریت پایدار شهرها تبدیل کرده است (Hui et al., 2023; Kumar et al., 2023). فضاهای سبز علاوه بر فراهم کردن محیط مناسب برای فعالیت‌های تفریحی و اجتماعی، در تنظیم خرداقلیم، کاهش جزیره گرمایی، بهبود کیفیت هوا، کنترل رواناب‌های سطحی نقش دارند (Martins, 2022). با این حال، حفظ پوشش گیاهی مستلزم مصرف مستمر آب است و این مسئله در مناطق خشک و نیمه‌خشک، به‌ویژه در شهر تهران با محدودیت منابع آب، اهمیت بیشتری دارد (Shojaei et al., 2018). آبیاری بیش از

نیاز می‌تواند موجب اتلاف آب از طریق تبخیر، رواناب و نفوذ عمقی شود، در حالی که کم‌آبایی سلامت و کیفیت بصری پوشش گیاهی را کاهش می‌دهد (Nouri et al., 2013a). بنابراین، برآورد دقیق نیاز آبی می‌تواند مبنایی برای تنظیم برنامه آبیاری، ارزیابی آب تحویلی و شناسایی ظرفیت‌های صرفه‌جویی در مصرف آب باشد (Gasser et al., 2024).

آب موردنیاز برای آبیاری فضای سبز شهری می‌تواند از منابع مختلف آب سطحی، زیرزمینی یا منابع نامتعارف تأمین شود (Jang et al., 2019; Qin and Horvath, 2020). هر یک از این منابع دارای هزینه‌ها و پیامدهای خاص خود از نظر اقتصادی، انرژی مصرفی، الزامات زیرساختی و اثرات محیط‌زیستی هستند (Sapkota et al., 2018; Santos et al., 2021). برای مثال انتقال آب از منابع سطحی مستلزم صرف انرژی برای انتقال و توزیع بوده و ممکن است با تلفات ناشی از نشت در شبکه همراه باشد (Hassanvand et al., 2021). از سوی دیگر، برداشت از منابع آب زیرزمینی در بسیاری از مناطق ایران با توجه به افت مستمر سطح آب و بیلان منفی آبخوان‌ها، نگرانی‌های جدی پایداری را به همراه دارد (Javadinia, 2025). همچنین اگرچه استفاده از پساب تصفیه‌شده به عنوان یکی از راهکارهای توسعه پایدار در مدیریت فضای سبز شهری مطرح شده است، اما فرآیند جمع‌آوری، تصفیه، انتقال و بهره‌برداری از آن نیز نیازمند مصرف انرژی و منابع بوده و باید از منظر محیط‌زیستی مورد ارزیابی قرار گیرد (Santos et al., 2024). از این رو، صرف‌نظر از منبع تأمین آب، تخمین میزان نیاز آبی واقعی گیاهان، مدیریت بهینه مصرف آب در فضای سبز شهری و جلوگیری از هدررفت آن، به یکی از مهم‌ترین الزامات مدیریت پایدار شهری تبدیل شده است. این مهم با انتخاب روش مناسب برآورد نیاز آبی و نیز ارزیابی سامانه آبیاری و رفع یا جایگزینی با سامانه‌های بهینه‌تر امکان‌پذیر است.

نیاز آبی فضای سبز، مقدار آبی است که برای جبران آب ازدست‌رفته از طریق تبخیر از سطح خاک و تعرق گیاه، با توجه به شرایط اقلیمی و ویژگی‌های پوشش گیاهی مورد نیاز است. یکی از مبانی اصلی این برآورد، تبخیر-تعرق مرجع (ET_0) است که بر اساس شرایط اقلیمی و داده‌های هواشناسی محاسبه می‌شود. از آنجا که ET_0 مربوط به یک سطح مرجع است، برای برآورد تبخیر-تعرق پوشش گیاهی واقعی باید تفاوت ویژگی‌های پوشش گیاهی و شرایط محیطی در محاسبات لحاظ شود. روش ضریب منظر (LCM) با اعمال ضرایب مرتبط با ویژگی‌های گیاهی، خرداقلیم و تراکم پوشش، ET_0 را به تبخیر-تعرق فضای سبز تبدیل می‌کند. یکی از منابع مورد استفاده برای تعیین ضریب مربوط به ویژگی‌های گیاهی در LCM، فهرست WUCOLS است. این سامانه در کالیفرنیا و با مشارکت متخصصان توسعه یافته و گونه‌های گیاهی را بر اساس نیاز آبی نسبی آنها طبقه‌بندی می‌کند. ضرایب این سامانه بر پایه مشاهدات میدانی تبخیر-تعرق پوشش گیاهی در مناطق مختلف کالیفرنیا و مقایسه آن با ET_0 تعیین شده‌اند (Costello et al., 2000). در پژوهش حاضر، WUCOLS به عنوان یک روش مستقل محاسبه نیاز آبی به کار نرفته است، بلکه ضریب گونه‌ای (k_s) متناظر با گونه‌های موجود در قطعه مورد مطالعه از آخرین نسخه آن یعنی WUCOLS III استخراج و در چارچوب LCM برای برآورد تبخیر-تعرق پوشش گیاهی استفاده شده است؛ از این ترکیب در ادامه با عنوان LCM-WUCOLS یاد شده است. با توجه به منشأ تجربی ضرایب WUCOLS و توسعه آنها در شرایط اقلیمی و محیطی کالیفرنیا، بررسی قابلیت کاربرد این ضرایب در سایر مناطق، از جمله تهران، ضروری است. در این پژوهش، برای ارزیابی نتایج LCM-WUCOLS، از قابلیت نرم‌افزار i-Tree Eco برای برآورد تبخیر-تعرق پوشش گیاهی بر اساس ویژگی‌های واقعی درختان و داده‌های هواشناسی استفاده شده است. بدین ترتیب، برآورد حاصل از i-Tree Eco به عنوان مبنایی مستقل برای ارزیابی میزان انطباق نتایج LCM-WUCOLS مورد استفاده قرار گرفته است.

بابائیان و همکاران (۱۳۹۹) با استفاده از LCM-WUCOLS نیاز آبی فضای سبز منطقه چهار تهران را برآورد کردند و نشان دادند که افزایش راندمان آبیاری می‌تواند به صرفه‌جویی قابل توجه در برداشت آب منجر شود. سجودی و میرزائی (۱۳۹۹) نیز LCM-WUCOLS را با روش بیلان آب مقایسه کردند و عملکرد مناسب آن در برآورد تبخیر-تعرق فضای سبز را گزارش نمودند. انصاری و همکاران (۱۴۰۰) سه روش LCM-WUCOLS، ضریب گیاهی (PF) و آبیاری فضای باز عمومی (IPOS) را برای فضای سبز منطقه یک تهران مقایسه کرده و LCM-WUCOLS را روشی جامع‌تر برای شرایط مورد مطالعه معرفی کردند. در مطالعات بین‌المللی (Nouri et al., 2013b) با مقایسه LCM-WUCOLS، PF و IPOS در فضای سبز شهری استرالیا، دقت مناسب LCM-WUCOLS را در مقایسه با مقدار واقعی آبیاری نشان دادند. همچنین، Ghazal (2026) با مقایسه یک روش جدید

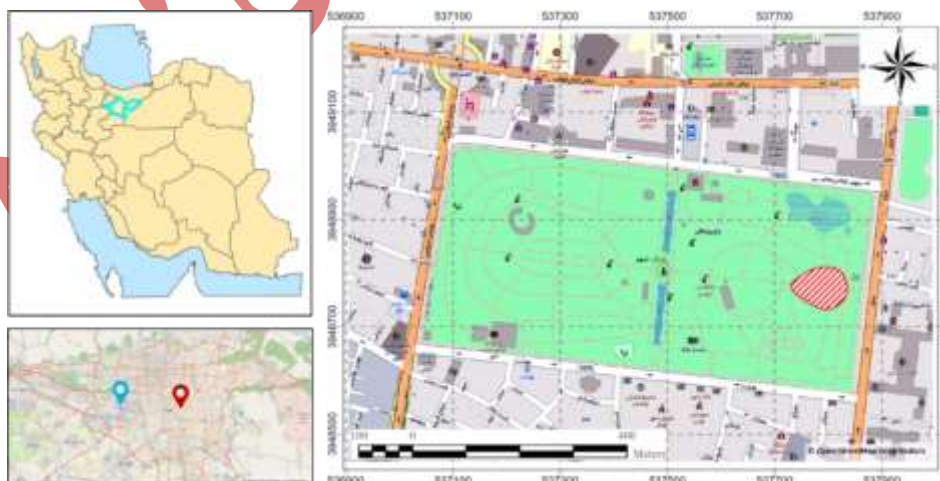
نیاز آبی گیاهان شهری (PWR) با LCM-WUCOLS و SLIDE، همبستگی بالایی میان PWR و LCM-WUCOLS گزارش کرد. (Alazba et al. 2025) نیز LCM-WUCOLS را با روش LIMP در سطوح مختلف کم‌آبیاری مقایسه کردند و نشان دادند که عملکرد نسبی روش‌ها به شدت تنش آبی وابسته است. با این حال، نتایج پژوهش Shojaei et al. (2018) نشان داد که میزان انطباق برآورد LCM-WUCOLS با روش LIMP، به‌عنوان رویکردی مبتنی بر اندازه‌گیری‌های میدانی تبخیر-تعرق، می‌تواند با توجه به نوع و ساختار پوشش گیاهی متفاوت باشد؛ به‌طوری‌که میزان انطباق در دو فضای سبز مورد مطالعه اما در اقلیم یکسان، به‌ترتیب حدود ۹۵ و ۶۶ درصد گزارش شد.

در مجموع، مطالعات پیشین نشان می‌دهند که LCM-WUCOLS به دلیل سادگی کاربرد، نیاز محدود به داده‌های ورودی و قابلیت لحاظ کردن تفاوت نیاز آبی گونه‌های گیاهی، روشی کاربردی برای برآورد نیاز آبی فضای سبز شهری است. با این حال، ماهیت تجربی ضرایب WUCOLS و توسعه آنها در شرایط کالیفرنیا، ضرورت بررسی قابلیت تعمیم این ضرایب به شرایط اقلیمی و پوشش گیاهی متفاوت را مطرح می‌کند. از این‌رو، صحت‌سنجی نتایج پیش از تعمیم LCM-WUCOLS به قطعات دیگر فضای سبز می‌تواند از بروز خطاهای سیستماتیک در برآورد نیاز آبی جلوگیری کند. در پژوهش حاضر، این موضوع با مقایسه نتایج LCM-WUCOLS و i-Tree Eco در یک قطعه فضای سبز شهری بررسی شده تا قابلیت کاربرد LCM-WUCOLS ارزیابی شود. بر این اساس، نوآوری پژوهش حاضر در ارزیابی و صحت‌سنجی قابلیت کاربرد LCM-WUCOLS در شرایط فضای سبز شهری تهران با استفاده از برآورد تبخیر-تعرق مبتنی بر ویژگی‌های واقعی پوشش گیاهی در i-Tree Eco است.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

پارک شهر تهران یکی از قدیمی‌ترین و مهم‌ترین فضاهای سبز عمومی شهر تهران است که علاوه بر ارزش تاریخی و اجتماعی، از نظر محیط‌زیستی و تأمین خدمات اکوسیستمی اهمیت ویژه‌ای دارد. این مجموعه شامل قطعات مختلف فضای سبز، مسیرهای دسترسی، فضاهای خدماتی و عناصر مختلف منظر است که هر یک از نظر نوع پوشش گیاهی و نیاز آبی ویژگی‌های متفاوتی هستند. در پژوهش حاضر، قطعه ۴۸ پارک شهر به‌عنوان محدوده مورد مطالعه انتخاب شد. این قطعه دارای پوشش گیاهی متنوعی از جمله درختان، درختچه‌ها و پوشش گیاهی سطحی بوده و در بخش پیرامونی آن نیز تعدادی درخت چنار بالغ و نسبتاً قدیمی استقرار دارند. قطعه ۴۸ پارک شهر با مساحت ۴۳۴۳ مترمربع در بخش شرقی پارک واقع شده است (شکل ۱).



شکل ۱- موقعیت پارک شهر تهران و قطعه ۴۸ در نقشه پارک (موقعیت پارک و ایستگاه سینوپتیک مهرآباد به ترتیب با نشانگرهای قرمز و آبی مشخص شده‌اند)

مشخصات سامانه آبیاری قطعه ۴۸

آبیاری فضای سبز قطعه ۴۸ با استفاده از سامانه آبیاری تحت فشار انجام می‌شود. با توجه به تفاوت شرایط آبیاری درختان پیرامونی و پوشش گیاهی سطحی، دو روش اصلی آبیاری در این قطعه مورد استفاده قرار گرفته است. درختان چنار پیرامونی

به صورت موضعی با استفاده از بابلرهای دارای ورودی ۱۶ میلی متر و دبی $(\frac{m^3}{hour}) 0.2$ آبیاری می شوند. پوشش گیاهی سطحی نیز با استفاده از آبپاش های مخفی شونده شرکت Hunter آبیاری می شود. تجهیزات مورد استفاده شامل ۵۲ دستگاه آبپاش ثابت PS Ultra با ورودی $0.5 (\frac{m^3}{hour})$ اینچ و دبی $1.2 (\frac{m^3}{hour})$ و ۳۱ دستگاه آبپاش چرخشی PGP با ورودی $0.75 (\frac{m^3}{hour})$ اینچ و دبی $3.2 (\frac{m^3}{hour})$ است. اطلاعات مربوط به نوع، تعداد و مشخصات تجهیزات بر اساس برداشت و بررسی میدانی سامانه موجود در قطعه ۴۸ به دست آمده است.

مطابق برنامه بهره برداری سامانه، مدت زمان اختصاص یافته به آبیاری قطعه ۴۸ در هر نوبت حدود ۲۰ دقیقه است. عملیات آبیاری در مجموع ۲۰۵ نوبت در سال انجام می شود که تناوب آن در جدول ۱ ارائه شده است. مطابق این برنامه، از ابتدای اردیبهشت تا پایان شهریور آبیاری به صورت روزانه، در ماه های مهر، اسفند و فروردین یک روز در میان و در سایر ماه های سال بین صفر تا دو روز در ماه انجام می شود. مدت زمان هر نوبت آبیاری کل پارک ۵ ساعت است که از این مقدار، حدود ۲۰ دقیقه به آبیاری قطعه ۴۸ اختصاص می یابد. آب مورد نیاز سامانه از طریق پمپاژ آب از یک حلقه چاه تأمین شده و سپس به وسیله آبپاش های بارانی و بابلرها در اختیار پوشش گیاهی قرار می گیرد.

جدول ۱- تناوب آبیاری قطعه ۴۸

فصل	ماه	تعداد روز	مجموع فصلی	مجموع سالانه			
بهار	فروردین	۱۵	۷۷	۲۰۵			
	اردیبهشت	۳۱					
	خرداد	۳۱					
تابستان	تیر	۳۱	۹۳		۲۰۵		
	مرداد	۳۱					
	شهریور	۳۱					
پاییز	مهر	۱۵	۱۷			۲۰۵	
	آبان	۲					
	آذر	۰					
زمستان	دی	۱	۱۸				۲۰۵
	بهمن	۲					
	اسفند	۱۵					

مشخصات پوشش گیاهی قطعه ۴۸

پوشش گیاهی این قطعه شامل ۹۹۷ اصله/عدد گیاه از ۲۸ گونه مختلف شامل درختان، درختچه ها، گل های زینتی و چمن است. ۹۸ درصد از مساحت این قطعه تحت پوشش چمن است. نام فارسی، نام علمی، نام لاتین متداول و تعداد هر یک از گونه ها در جدول ۲ ارائه شده است. همچنین، پوشش گیاهی این قطعه از نظر سنی متنوع بوده و شامل درختان کهن سال (مانند چنار) و نهال های جوان تر (درختان میوه) است که وجود طیفی از مراحل رشد را در ساختار پوشش گیاهی این قطعه نشان می دهد.

جدول ۲- انواع گونه های موجود در قطعه ۴۸ فضای سبز پارک شهر

ردیف	نوع گونه	نام فارسی	نام علمی	نام مرسوم	تعداد
۱	درخت	توت سفید	Morus alba	White mulberry	۱
۲	درختچه	ارس خرنده ژاپنی	Juniperus procumbens	Japanese garden juniper	۱
۳	درخت	زالزالک	Crataegus	Hawthorn spp	۱
۴	درخت	برگ بو	Laurus nobilis	Bay laurel	۱
۵	درخت	سنجد	Elaeagnus angustifolia	Russian olive	۱
۶	درخت	سرو شیرازی	Cupressus sempervirens	Italian cypress	۱
۷	درخت	کاج (ترکی)	Pinus brutia	Turkish pine	۱

۱	Pampas Grass	Cortaderia selloana	پامپاس گراس	گیاه علفی	۸
۳	Common apple	Malus domestica	سیب	درخت	۹
۳	Babylon weeping willow	Salix babylonica	بید مجنون	درخت	۱۰
۳	Oriental arborvitae	Platycladus orientalis	سرو خمره‌ای	درخت	۱۱
۴	Quince	Cydonia oblonga	به	درخت	۱۲
۴	Apricot	Prunus armeniaca	زردآلو	درخت	۱۳
۴	Deodar cedar	Cedrus deodora	سدروس	درخت	۱۴
۴	Peach	Prunus Persica	هلو	درخت	۱۵
۵	Sweet cherry	Prunus avium	گیلاس	درخت	۱۶
۶	Mahaleb cherry	Prunus mahaleb	آلبالو (گیلاس) تلخ	درخت	۱۷
۶	Pomegranate	Punica granatum	انار	درختچه	۱۸
۷	Common fig	Ficus carica	انجیر	درخت	۱۹
۱۰	Common plum	Prunus domestica	آلو	درخت	۲۰
۱۰	Japanese privet	Ligustrum japonicum	یاس هلندی	درختچه	۲۱
۱۰	Moundlily yucca	Yucca gloriosa	یوکای وحشی	درختچه	۲۲
۱۲	Maule's quince	Chaenomeles japonica	به ژاپنی	درختچه	۲۳
۱۳	New Zealand tenax	Phormium tenax	کنف نیوزلندی	درختچه	۲۴
۱۳	Southern magnolia	Magnolia grandiflora	مگنولیا	درخت	۲۵
۵۲	Oriental planetree	Platanus orientalis	چنار (شرقی)	درخت	۲۶
۲۷۲	Hybrid tea rose	Rosa polliniana	رز مهندسی	بوته	۲۷
-	Turfgrasses (Cool season)	Poa trivialis	چمن فصل سرد	گیاه پوششی	۲۸

برآورد تبخیر-تعرق مرجع

برای به دست آوردن مقدار ET_0 از قابلیت نرم‌افزار CROPWAT استفاده شد. به این منظور، ابتدا به کشف ایستگاه‌های سینوپتیک فعال در محدوده منطقه مورد مطالعه در نرم‌افزار CLIMWAT for CROPWAT پرداخته شد. تنها ایستگاه نزدیک، ایستگاه سینوپتیک فرودگاه مهرآباد بود. این ایستگاه در ارتفاع ۱۱۹۱ متر از سطح دریا و در مختصات $35/68$ درجه شمالی و $51/35$ درجه شرقی قرار دارد. میانگین بلندمدت داده‌های اقلیمی شامل دمای حداقل (T_{min})، دمای حداکثر (T_{max})، درصد رطوبت نسبی (RH)، سرعت باد ($Wind\ Speed$) و تعداد ساعات خورشیدی ($Sunshine\ hours$) برای دوره آماری (۱۹۶۱-۲۰۰۰) آن از CLIMWAT استخراج و وارد CROPWAT شد (جدول ۳) و مقدار تابش خورشیدی ($Radiation$) و تبخیر-تعرق مرجع (ET_0) به تفکیک همراه بدست آمد. به این ترتیب، مجموع سالانه ET_0 برابر است با ۱۲۸۶ میلی‌متر.

جدول ۳- متغیرهای اقلیمی ایستگاه فرودگاه مهرآباد و تبخیر-تعرق مرجع محاسبه شده توسط نرم‌افزار CROPWAT

ماه	T_{min} (°C)	T_{max} (°C)	RH (%)	Wind (km day ⁻¹)	Sunshine (h)	Radiation (MJ m ⁻² day ⁻¹)	ET_0 (mm day ⁻¹)
ژانویه	-۱/۱	۷/۲	۱۰۰	۱۵۶	۵/۲	۹/۲	۰/۶۲
فوریه	۰/۷	۹/۹	۸۳	۲۲۵	۵/۸	۱۱/۹	۱/۲۸
مارس	۵/۲	۱۵/۴	۵۳	۲۸۵	۵/۹	۱۴/۷	۳/۰۳
آوریل	۱۰/۹	۲۱/۹	۵۶	۳۲۰	۶/۴	۱۷/۸	۴/۲۹
می	۱۶/۱	۲۸/۰	۶۶	۳۲۰	۸/۴	۲۲/۰	۵/۲۳
ژوئن	۲۰/۹	۳۴/۱	۶۹	۲۹۴	۱۰/۳	۲۵/۲	۶/۳۹
ژوئیه	۲۴	۳۶/۸	۵۹	۲۴۲	۱۰/۱	۲۴/۷	۷/۰۴
اگوست	۲۳	۳۵/۴	۶۷	۲۱۶	۹/۸	۲۳/۰	۶/۱۲
سپتامبر	۱۹/۲	۳۱/۵	۷۳	۲۰۷	۹/۲	۱۹/۶	۴/۷۴
اکتبر	۱۲/۹	۲۴/۰	۷۹	۲۰۷	۷/۷	۱۴/۷	۲/۹۱
نوامبر	۶/۷	۱۶/۵	۹۸	۱۷۳	۶/۳	۱۰/۶	۱/۲۵
دسامبر	۱/۳	۹/۸	۱۰۰	۱۵۶	۵/۴	۸/۷	۰/۷۰
میانگین	۱۱/۷	۲۲/۵	۷۵	۲۳۳	۷/۵	۱۶/۸	۳/۶۳

برآورد نیاز آبی با روش LCM-WUCOLS

روش LCM-WUCOLS، یکی از روش‌های متداول برآورد نیاز آبی فضای سبز شهری است که توسط دانشگاه کالیفرنیا توسعه یافته است. این روش با لحاظ کردن تنوع گونه‌های گیاهی، تراکم پوشش و شرایط خرداقلیمی، برای برآورد نیاز آبی فضای سبز مناسب است. مقادیر حاصل، برآوردی از نیاز آبی گیاهان هستند و در صورت لزوم باید با توجه به شرایط واقعی محل و عملکرد سامانه آبیاری اصلاح شوند. در برآورد نیاز آبی محصولات کشاورزی، تبخیر-تعرق واقعی گیاه (ET_c) از معادله (۱) محاسبه می‌شود:

$$ET_c = K_c \times ET_0 \quad \text{رابطه (۱)}$$

که در آن، K_c ضریب گیاهی و ET_0 نماینده تبخیر-تعرق مرجع است. K_c از مطالعات مزرعه‌ای و با استفاده از معادله (۲) تعیین می‌شود (Pereira et al., 2021):

$$K_c = \frac{ET_c}{ET_0} \quad \text{رابطه (۲)}$$

اگرچه استفاده از K_c برای محصولات زراعی که معمولاً از پوشش گیاهی یکنواخت برخوردارند مناسب است، فضای سبز شهری به دلیل تنوع گونه‌های گیاهی، تفاوت نیاز آبی، تراکم پوشش و شرایط خرداقلیمی، ناهمگونی بیشتری دارد. بنابراین، استفاده از یک ضریب گیاهی ثابت برای این محیط‌ها مناسب نیست. روش LCM با معرفی ضریب منظر (K_L) علاوه بر ویژگی‌های گونه گیاهی، اثر تراکم پوشش و شرایط خرداقلیمی را نیز در محاسبات لحاظ می‌کند و به‌طور ویژه برای مناظر و فضای سبز شهری توسعه یافته است. در روش LCM، تبخیر-تعرق فضای سبز (ET_L) از معادله (۳) محاسبه می‌شود (Costello et al., 2000):

$$ET_L = K_L \times ET_0 \quad \text{رابطه (۳)}$$

که K_L طبق معادله (۴)، از حاصل ضرب سه ضریب مستقل تشکیل می‌شود:

$$K_L = k_s \times k_d \times k_{mc} \quad \text{رابطه (۴)}$$

k_s : عامل گونه گیاهی

k_d : عامل تراکم پوشش گیاهی

k_{mc} : عامل خرداقلیم

عامل گونه گیاهی (k_s)

پارامتر k_s بیانگر نیاز آبی ذاتی هر گونه گیاهی است و بر اساس مطالعات تجربی تعیین می‌شود. فهرست WUCOLS با توجه به شرایط اقلیمی مناطق مختلف در کالیفرنیا برای انتخاب این عامل توسعه داده شده است. بنابراین با توجه به نوع گونه و خصوصیات آب‌وهوایی منطقه موردنظر، مقادیر این عامل باید از فهرست WUCOLS استخراج شود که نحوه استخراج در بخش "استخراج عامل k_s از فهرست WUCOLS" به تفصیل شرح داده شده است. براساس این فهرست گیاهان از نظر نیازآبی در چهار گروه "خیلی کم"، "کم"، "متوسط" و "زیاد" طبقه‌بندی می‌شوند که این مقدار بین کمتر از ۰/۱ تا ۰/۹ متغیر است (جدول ۴). در تعیین k_s ، سه حالت ممکن است رخ دهد:

- فضای سبز تک‌گونه‌ای: ضریب همان گونه مستقیماً استفاده می‌شود.
- فضای سبز چندگونه‌ای با نیاز آبی مشابه: یک مقدار نماینده برای کل مجموعه انتخاب می‌شود.
- فضای سبز چندگونه‌ای با نیازهای آبی متفاوت: معمولاً ضریب گونه‌ای انتخاب می‌شود که بیشترین نیاز آبی را دارد تا از تنش آبی سایر گیاهان جلوگیری شود؛ هرچند این موضوع ممکن است موجب آبیاری بیش از نیاز برخی گونه‌ها شود.

قطعه منتخب این پژوهش در گروه سوم، یعنی فضای سبز چندگونه‌ای با نیازهای آبی متفاوت، قرار داشت؛ بنابراین، ضریب گونه‌ای متناظر با گونه دارای بیشترین نیاز آبی به عنوان معیار تعیین k_s در نظر گرفته شد.

عامل تراکم پوشش گیاهی (k_d)

پارامتر k_d اثر میزان پوشش گیاهی موجود در واحد سطح را بر تبخیر-تعرق نشان می‌دهد. این ضریب بین ۰/۵ تا ۱/۳ تغییر می‌کند و مطابق جدول ۴ در سه گروه طبقه‌بندی می‌شود. از آنجایی که استاندارد برای انتخاب این عامل وجود ندارد و انتخاب آن می‌تواند چالش برانگیز باشد، می‌توان برای تعیین این عامل از دو پارامتر زیر کمک گرفت:

- درصد پوشش تاج یا همان سایه‌اندازی که نشان‌دهنده درصد سطح زمین پوشیده شده توسط تاج و برگ گیاهان است؛
- لایه‌بندی ارتفاعی پوشش گیاهی که وجود هم‌زمان درخت، درختچه و پوشش علفی را در فضای سبز بیان می‌کند.

از نظر سایه‌اندازی، برای درختان، برای سایه‌اندازی ۷۰ تا ۱۰۰ درصدی k_d متوسط و برای کمتر از این مقدار k_d کم در نظر گرفته می‌شود. برای درختچه‌ها و سایر پوشش‌های گیاهی، برای سایه‌اندازی ۹۰ تا ۱۰۰ درصدی k_d متوسط و برای کمتر از این مقدار k_d کم در نظر گرفته می‌شود. از نظر تنوع ارتفاعی، وجود گیاهان با ارتفاع‌های متفاوت برای مثال وجود هم‌زمان درختان بلند، کوتاه، درختچه و نیز گیاهان پوششی در واقع باعث افزایش تراکم می‌شود که در نتیجه باعث افزایش تبخیر-تعرق می‌گردد. البته باید به نوع برگ‌ها، جوان بودن درختان و فاصله گونه‌ها از یکدیگر نیز توجه داشت. لذا تنوع ارتفاعی بالا به همراه سایه‌اندازی بالا می‌تواند منجر به انتخاب مقادیر دسته زیاد برای k_d شود. طبق دستورالعمل LCM، مقادیر پیشنهادی برای این عامل برای "گیاهان تنک و جوان" دسته کم، برای "محدوده پوشیده شده اغلب از یک نوع گیاه" دسته متوسط و "محدوده با تنوع گیاهی و ارتفاعی بالا" دسته زیاد است (Costello et al., 2000).

عامل خرداقلیم (k_{mc})

اثر شرایط محیطی محل کاشت را بر تبخیر-تعرق در نظر می‌گیرد. طبق جدول ۴، دامنه آن بین ۰/۵ تا ۱/۴ است. به طور کلی:

- پارک‌ها و فضاهای باز دارای شرایط استاندارد در گروه متوسط قرار می‌گیرند.
- محیط‌های سایه‌دار یا محافظت‌شده در برابر باد دارای مقدار کمتر هستند.
- محیط‌های مجاور آسفالت، پارکینگ، دیوارهای جنوبی یا مناطق بادخیز دارای ضریب بیشتری خواهند بود.

جدول ۴- مقادیر عامل‌های محاسبه K_L (Costello et al., 2000)

عامل	خیلی کم	کم	متوسط	زیاد
k_s	< 0.1	$0.1 - 0.3$	$0.4 - 0.6$	$0.7 - 0.9$
k_d	-	$0.5 - 0.9$	۱	$1.1 - 1.3$
k_{mc}	-	$0.5 - 0.9$	۱	$1.1 - 1.4$

استخراج k_s از فهرست WUCOLS III

فهرست WUCOLS III به عنوان مکمل روش LCM و بخشی از راهنمای «برآورد نیاز آبی برای آبیاری گیاهان فضای سبز در کالیفرنیا» تدوین شده است (Costello et al., 2000). این فهرست، نیاز آبی بیش از ۱۹۰۰ گونه گیاهی را در شش منطقه اقلیمی کالیفرنیا ارائه می‌کند که بر اساس مطالعات میدانی و نظر کارشناسان، در چهار گروه بسیار کم (VL)، کم (L)، متوسط (M) و زیاد (H) طبقه‌بندی شده‌اند. این گروه‌ها به ترتیب معادل کمتر از ۱۰، ۱۰ تا ۳۰، ۴۰ تا ۶۰ و ۷۰ تا ۹۰ درصد ET_0 هستند. مقدار مناسب k_s در هر بازه نیز با توجه به شرایط محل و وضعیت پوشش گیاهی تعیین می‌شود.

از آنجا که فهرست WUCOLS III بر اساس شش منطقه اقلیمی اصلی ایالت کالیفرنیا تدوین شده است، برای استفاده از آن در این پژوهش ابتدا لازم بود مناسب‌ترین منطقه اقلیمی متناظر با محدوده مورد مطالعه تعیین شود. بدین منظور، داده‌های ET_0 مربوط به ۱۸ ایستگاه منتخب از سامانه اطلاعات مدیریت آبیاری کالیفرنیا (CIMIS)، که هر یک نماینده یکی از نواحی تبخیر-تغرق مرجع در این سامانه بودند، با داده‌های ایستگاه سینوپتیک فرودگاه مهرآباد، به‌عنوان ایستگاه مرجع پژوهش، مقایسه شدند. هر یک از این ۱۸ ایستگاه، بر اساس طبقه‌بندی WUCOLS، در یکی از شش منطقه اقلیمی این دستورالعمل قرار می‌گیرد. به‌منظور پوشش طیف اقلیمی موجود در مناطق WUCOLS، ایستگاه‌های منتخب از مناطق مختلف CIMIS انتخاب شدند و منطقه متناظر WUCOLS برای هر ایستگاه بر اساس طبقه‌بندی مربوطه تعیین شد. نام ایستگاه‌ها، ناحیه تبخیر-تغرق CIMIS و منطقه متناظر WUCOLS در جدول ۵ ارائه شده است.

جدول ۵- منطقه متناظر WUCOLS برای ایستگاه‌های واقع در ۱۸ ناحیه CIMIS

منطقه WUCOLS	نام ایستگاه	ناحیه تبخیر-تغرق CIMIS
۱	Santa Monica	۱
۱	Santa Cruz	۲
۱	Monterey/Salinas	۳
۱	San Diego	۴
۱	San Jose	۸
۲	Santa Rosa	۵
۲	Paicines	۱۰
۲	Fresno	۱۲
۲	Sacramento	۱۴
۲	Bakersfield	۱۵
۳	Los Angeles	۶
۴	Pasadena	۹
۴	Sonora	۱۱
۴	Hanford	۱۶
۵	Alturas	۷
۵	Quincy	۱۳
۶	Needles	۱۷
۶	Palm Springs	۱۸
مرجع	Tehran Mehrabad	-

به‌منظور ارزیابی میزان شباهت اقلیمی و انتخاب منطقه متناظر در فهرست WUCOLS، از شاخص‌های ضریب تعیین (R^2)، ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده (NRMSE)، ضریب کارایی نش-ساتکلیف نرمال شده (NNSE) و میانگین اختلاف نسبی (ΔET_0) استفاده شد که معادلات مربوط به این شاخص‌ها در روابط ۵ تا ۸ آورده شده است.

$$R^2 = \frac{[\sum_{t=1}^n (ET_{0, Ref. t} - \overline{ET_{0, Ref}})(ET_{0, CIMIS. t} - \overline{ET_{0, CIMIS}})]^2}{\sum_{t=1}^n (ET_{0, Ref. t} - \overline{ET_{0, Ref}})^2 \sum_{t=1}^n (ET_{0, CIMIS. t} - \overline{ET_{0, CIMIS}})^2} \quad \text{(رابطه ۵)}$$

$$NRMSE = \frac{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{t=1}^n (ET_{0, CIMIS. t} - ET_{0, Ref. t})^2}}{\overline{ET_{0, Ref}}} \quad \text{(رابطه ۶)}$$

$$NNSE = \frac{1}{\left(1 - \frac{\sum_{t=1}^n (ET_{0, CIMIS, t} - ET_{0, Ref, t})^2}{\sum_{t=1}^n (ET_{0, Ref, t} - \overline{ET_{0, Ref}})^2}\right)} \quad \text{رابطه ۷}$$

$$\Delta ET_0 = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n |ET_{0, CIMIS, t} - ET_{0, Ref, t}| \quad \text{رابطه ۸}$$

$ET_{0, Ref, t}$: تبخیر-تعرق مرجع ایستگاه فرودگاه مهرآباد در ماه t
 $ET_{0, CIMIS, t}$: تبخیر-تعرق مرجع ایستگاه مورد بررسی در کالیفرنیا در ماه t
 $\overline{ET_{0, Ref}}$: میانگین ماهانه ET_0 ایستگاه مرجع
 n : تعداد ماه‌ها

محاسبه راندمان آبیاری بر پایه روش LCM-WUCOLS

در روش LCM-WUCOLS، تمامی آب اعمال شده به فضای سبز توسط گیاهان به صورت مفید مصرف نمی‌شود و بخشی از آن ممکن است در اثر رواناب، بادبردگی، نفوذ عمقی و سایر تلفات سامانه از دسترس گیاه خارج شود. از این رو، برای تعیین مقدار کل آب مورد نیاز جهت آبیاری، علاوه بر نیاز آبی فضای سبز، راندمان آبیاری نیز باید در نظر گرفته شود. در این روش، راندمان آبیاری به صورت نسبت مقدار آب مورد استفاده مفید توسط پوشش گیاهی به کل آب اعمال شده به فضای سبز تعریف می‌شود و به صورت رابطه ۹ محاسبه می‌گردد (Costello et al., 2000):

$$IE(\%) = \frac{ET_L}{TWA} \times 100 \quad \text{رابطه ۹}$$

که در آن IE بیانگر راندمان آبیاری، ET_L تبخیر-تعرق فضای سبز یا مقدار آب مورد نیاز برآورده شده برای تأمین نیاز آبی پوشش گیاهی $\left(\frac{m^3}{year}\right)$ و TWA ، کل آب اعمال شده به فضای سبز در طول دوره مورد بررسی $\left(\frac{m^3}{year}\right)$ است. در چارچوب این روش، آب مفید مورد استفاده توسط پوشش گیاهی معادل ET_L در نظر گرفته می‌شود.

با توجه به اینکه تعیین راندمان آبیاری در فضای سبز از نظر میدانی دشوار است و روش استاندارد واحدی برای تمامی انواع پوشش‌های فضای سبز وجود ندارد، روش LCM-WUCOLS سه رویکرد محاسبه، برآورد و تعیین مقدار هدف را برای تعیین راندمان مطرح می‌کند. در رویکرد محاسباتی، مقدار ET_L از رابطه نیاز آبی فضای سبز و مقدار TWA از میزان واقعی آب اعمال شده به سامانه آبیاری به دست می‌آید. در این پژوهش، به منظور استفاده از رویکرد محاسباتی، مقدار آب اعمال شده بر اساس عملکرد واقعی تجهیزات آبیاری موجود در قطعه مورد مطالعه تعیین شد. بدین منظور، دبی واقعی آبیاری‌ها و بابلرها با اندازه‌گیری میدانی تعیین و سپس با در نظر گرفتن تعداد تجهیزات، مدت زمان هر نوبت آبیاری و تعداد دفعات آبیاری در دوره مورد بررسی، TWA بر اساس رابطه ۱۰ محاسبه شد:

$$TWA = (Q_{H1} \times N_{H1} + Q_{H2} \times N_{H2} + Q_B \times N_B) \times D \times n \quad \text{رابطه ۱۰}$$

که Q_{H1} ، Q_{H2} و Q_B به ترتیب نمایانگر دبی آبیاری‌های ثابت، آبیاری‌های چرخشی و بابلرها هستند. N_{H1} ، N_{H2} و N_B نیز تعداد هر یک از ادوات آبیاری را مشخص می‌کنند. متغیر D و n نیز به ترتیب نشان‌دهنده مدت هر دور آبیاری و تعداد دفعات آبیاری در طول یک سال می‌باشند.

بنابراین، راندمان آبیاری در این پژوهش به معنای راندمان آبیاری تعریف شده در چارچوب روش LCM-WUCOLS است و بیانگر نسبت نیاز آبی برآورده شده پوشش گیاهی به مقدار کل آب اعمال شده به سامانه آبیاری است. این شاخص برای ارزیابی میزان آب اضافی اعمال شده نسبت به نیاز آبی برآورده شده و بررسی وضعیت مصرف آب آبیاری در قطعه مورد مطالعه مورد استفاده قرار گرفت.

برآورد متغیرهای هیدرولوژیکی پوشش درختی و درختچه‌ای با نرم‌افزار i-Tree Eco

در این پژوهش، به منظور برآورد مؤلفه‌های هیدرولوژیکی مرتبط با پوشش درختی و درختچه‌ای قطعه ۴۸، از مدل هیدرولوژیکی نرم‌افزار i-Tree Eco استفاده شد. این مدل با استفاده از اطلاعات مربوط به شرایط هواشناسی و ویژگی‌های پوشش گیاهی، متغیرهای هیدرولوژیکی شامل تبخیر-تعرق بالقوه (PET)، تبخیر و تعرق واقعی، بارش رهگیری‌شده توسط پوشش گیاهی و رواناب اجتناب‌شده را در مقیاس زمانی ساعتی برآورد می‌کند. سپس مقادیر ساعتی برای محاسبه حجم سالانه هر یک از این مؤلفه‌ها جمع می‌شوند.

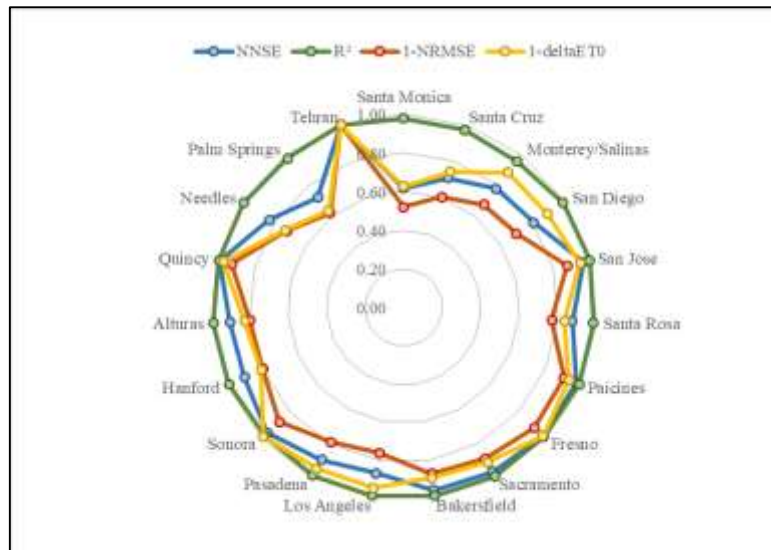
در نرم‌افزار i-Tree Eco پارامترهای هیدرولوژیکی بر اساس ترکیبی از داده‌های هواشناسی شامل دما، بارش، رطوبت نسبی، سرعت باد و تابش خورشیدی و همچنین مشخصات پوشش گیاهی نظیر گونه، قطر برابر سینه، ارتفاع، ابعاد تاج، وضعیت سلامت و سطح برگ محاسبه می‌شوند. نرم‌افزار اطلاعات مربوط به داده‌های هواشناسی را پس از معرفی ایستگاه سینوپتیک موردنظر به طور خودکار استخراج می‌کند. مشخصات پوشش گیاهی اما باید به صورت میدانی بررسی شده و به صورت دستی یا یک فایل اکسل، وارد نرم‌افزار شوند. لازم به ذکر است که در این پژوهش، سطح برگ و ابعاد تاج به طور مستقیم اندازه‌گیری نشده و نرم‌افزار با استفاده از روابط آلومتریک آنها را تخمین زده است. در این مدل، روابط فیزیکی حاکم بر تبادل آب میان پوشش گیاهی و جو به صورت ساعتی شبیه‌سازی شده و سپس نتایج در مقیاس سالانه گزارش می‌گردند. شرح مختصر متغیرهای هیدرولوژیکی مورد استفاده در این پژوهش در ادامه ارائه شده است. جزئیات کامل معادلات و الگوریتم‌های مورد استفاده در مدل در گزارش فنی Hirabayashi, (2015) ارائه شده است.

- تبخیر-تعرق بالقوه (PET): تبخیر-تعرق بالقوه بیانگر حداکثر میزان آب قابل انتقال از سامانه خاک-گیاه-اتمسفر در شرایطی است که محدودیتی از نظر دسترسی به آب وجود نداشته باشد. در مدل i-Tree Eco PET با استفاده از نسخه اصلاح‌شده معادله پنمن-مانتیت و با در نظر گرفتن شرایط هواشناسی و ویژگی‌های ساختاری پوشش گیاهی محاسبه می‌شود.
- تعرق: به فرآیند انتقال آب از داخل گیاه به اتمسفر از طریق روزنه‌های برگ اطلاق می‌شود. در i-Tree Eco تعرق بر اساس ویژگی‌های واقعی پوشش گیاهی شامل سطح برگ، گونه گیاهی، وضعیت تاج و شرایط هواشناسی برآورد می‌شود.
- تبخیر: شامل اتلاف آب از سطح برگ‌ها، شاخه‌ها و سایر سطوح مرطوب پوشش گیاهی است. این مؤلفه به‌ویژه پس از رخدادهای بارندگی یا آبیاری اهمیت می‌یابد و مقدار آن تابعی از شرایط جوی، میزان آب ذخیره‌شده بر روی تاج پوشش و ویژگی‌های ساختاری گیاهان است.
- بارش رهگیری‌شده: مقدار بارشی است که پیش از رسیدن به سطح زمین توسط تاج پوشش گیاهی رهگیری می‌شود. این مؤلفه بیانگر نقش تاج پوشش در دریافت و نگهداری موقت آب بارش است. ظرفیت رهگیری آب به عواملی نظیر سطح برگ، تراکم تاج و ویژگی‌های گونه‌های گیاهی وابسته است.
- رواناب اجتناب‌شده: بیانگر کاهش حجم رواناب سطحی ناشی از حضور پوشش گیاهی است. این متغیر از طریق مقایسه شرایط واقعی دارای پوشش گیاهی با یک وضعیت فرضی بدون پوشش گیاهی محاسبه می‌شود.

یافته‌های پژوهش

نتایج برآورد نیاز آبی با روش LCM-WUCOLS

نتایج مقایسه ایستگاه مرجع و ایستگاه‌های کالیفرنیا در شکل ۳ آورده شده است که براساس آن، ایستگاه‌های موجود در منطقه اقلیمی شماره دو در فهرست WUCOLS (Bakersfield, Sacramento, Fresno و Paicines)، بیشترین انطباق را با شرایط اقلیمی ایستگاه مرجع این مطالعه دارد؛ از این رو، مقادیر k_s برای تمامی گونه‌های گیاهی قطعه ۴۸ بر اساس این منطقه استخراج شدند. همچنین در شکل ۴، مقدار ET_0 شبیه‌ترین ایستگاه کالیفرنیا به ایستگاه مرجع برای مقایسه با آن آورده شده است.



شکل ۳- مقایسه تبخیر-تعرق مرجع ایستگاه‌های ایالت کالیفرنیا و فرودگاه مهرآباد برای دوره (۲۰۰۰-۱۹۶۱) بر اساس ۴ شاخص ارزیابی



شکل ۴- مقایسه تبخیر-تعرق روزانه ایستگاه Fresno و فرودگاه مهرآباد

طبقه نیاز آبی و مقادیر k_s اختصاص یافته به گونه‌های قطعه ۴۸ در جدول ۶ ارائه شده است. لازم به ذکر است، از آنجا که فهرست WUCOLS مقدار دقیق k_s را ارائه نمی‌کند و تنها گونه‌ها را در قالب چهار طبقه نیاز آبی به صورت کیفی طبقه‌بندی می‌کند، لازم است برای هر گونه یک مقدار مشخص از بازه متناظر انتخاب شود. در این پژوهش، مقدار میانی هر بازه به عنوان مقدار k_s آن طبقه در نظر گرفته شد.

جدول ۶- مقادیر k_s برای گونه‌های قطعه ۴۸

ردیف	نام گونه	نام علمی	نام موجود در WUCOLS	نیاز آبی	k_s
۱	توت سفید	Morus alba	Morus alba	M	۰/۵
۲	ارس خزنه ژاپنی	Juniperus procumbens	Juniperus spp.	L	۰/۲
۳	زالزالک	Crataegus	Crataegus spp.	M	۰/۵
۴	برگ بو	Laurus nobilis	Laurus nobilis	L	۰/۲
۵	سنجد	Elaeagnus angustifolia	Elaeagnus angustifolia	L	۰/۲
۶	سرو شیرازی	Cupressus sempervirens	Cupressus sempervirens	M	۰/۵
۷	کاج (ترکی)	Pinus brutia	Pinus brutia	L	۰/۲
۸	پامپاس گراس	Cortaderia selloana	Cortaderia sellowana cvs.	L	۰/۲

۰/۵	M	Malus spp. (Apple)	Malus domestica	سیب	۹
۰/۸	H	Salix spp.	Salix babylonica	بید مجنون	۱۰
۰/۵	M	Platycladus orientalis	Platycladus orientalis	سرو خمرهای	۱۱
۰/۵	M*	Cydonia oblonga	Cydonia oblonga	به	۱۲
۰/۵	M	Prunus spp. (Apricot)	Prunus armeniaca	زردآلو	۱۳
۰/۵	M	Cedrus deodora	Cedrus deodora	سدروس	۱۴
۰/۵	M	Prunus spp. (Peach)	Prunus Persica	هلو	۱۵
۰/۵	M	Prunus spp. (Cherry)	Prunus avium	گیلاس	۱۶
۰/۵	M*	Prunus spp. (Cherry)	Prunus mahaleb	آلبالو تلخ	۱۷
۰/۵	M	Punica granatum	Punica granatum	انار	۱۸
۰/۵	M	Ficus carica	Ficus carica	انجیر	۱۹
۰/۶	M	Prunus spp. (Plum)	Prunus domestica	آلو	۲۰
۰/۵	M	Ligustrum japonicum	Ligustrum japonicum	یاس هندی	۲۱
۰/۲	L	Yucca spp.	Yucca gloriosa	یوکای وحشی	۲۲
۰/۲	L	Chaenomeles cvs.	Chaenomeles japonica	به ژاپنی	۲۳
۰/۲	L	Phormium tenax	Phormium tenax	کف نیوزلندی	۲۴
۰/۵	M	Magnolia grandiflora	Magnolia grandiflora	مگنولیا	۲۵
۰/۵	M*	Platanus X acerifolia and cvs.	Platanus orientalis	چنار (شرقی)	۲۶
۰/۵	M	Rosa hybrids..bush	Rosa polliniana	رز مهندسی	۲۷
۰/۸	H	Turfgrasses (Cool-season)	Poa trivialis	چمن فصل سرد	۲۸

مواردی که با (*) مشخص شده‌اند در فهرست WUCOLS موجود نبودند؛ بنابراین نزدیک‌ترین گونه به آنها انتخاب شده است.

برای برآورد k_s ، سهم هر یک از این دو بخش چمنی و غیرچمنی متناسب با درصد پوشش آن‌ها در کل مساحت لحاظ شد. در بخش چمنی، اگرچه گونه‌های مختلفی از جمله چنار، بوته‌های رز و بید مجنون نیز حضور دارند، اما مطابق فهرست WUCOLS تنها گونه بید مجنون در طبقه نیاز آبی زیاد (H) قرار دارد و سایر گونه‌ها در طبقه نیاز آبی متوسط (M) یا کم (L) طبقه‌بندی شده‌اند. بنابراین با توجه به اینکه چمن پرآب‌برترین گونه در این قسمت است، طبق دستورالعمل، نیازآبی آن به عنوان معیار برآورد نیاز آبی در نظر گرفته شد و مقدار ۰/۸ برای k_s در نظر گرفته شد. این مقدار علاوه بر پوشش چمن، نیاز آبی گونه بید مجنون را نیز تأمین می‌کند ولی باید توجه داشت که سایر گیاهان آبی بیش از نیاز واقعی‌شان دریافت خواهند کرد. بنابراین سهم بخش چمنی از ضریب گونه‌ای طبق رابطه ۱۱ برابر است با:

$$k_{s1} = k_s \text{ grass} = 0.98 \times 0.8 = 0.784 \quad (\text{رابطه ۱۱})$$

در بخش غیرچمنی که حدود ۲ درصد از مساحت قطعه را تشکیل می‌دهد، گونه‌های غالب شامل درختان چنار و بوته‌های رز هستند که هر دو در طبقه نیاز آبی متوسط قرار می‌گیرند. بنابراین برای این بخش، مقدار ۰/۵ به عنوان ضریب گونه‌ای انتخاب شد:

$$k_{s2} = 0.02 \times 0.5 = 0.01 \quad (\text{رابطه ۱۲})$$

در نتیجه، ضریب گونه‌ای کل قطعه مطابق رابطه ۱۳ برابر است با:

$$k_s = k_{s1} + k_{s2} = 0.784 + 0.01 = 0.794 \quad (\text{رابطه ۱۳})$$

برای تعیین k_d ، با توجه به تراکم نسبتاً زیاد پوشش گیاهی، فاصله اندک بین گیاهان، وجود درختان چنار تنومند با سایه‌اندازی قابل توجه در پیرامون قطعه و همچنین تنوع ارتفاعی زیاد پوشش گیاهی، مقدار ۱/۲ انتخاب شد. از سوی دیگر، قطعه ۴۸ در داخل محدوده پارک قرار دارد و تحت تأثیر شرایط معمول خرداقلیمی فضای سبز شهری است؛ بنابراین مطابق دستورالعمل WUCOLS، مقدار ۱/۰ برای k_{mc} در نظر گرفته شد. در نهایت، با استفاده از مقدار تبخیر-تعرق مرجع سالانه ایستگاه مهرآباد به عنوان ET_0 ، نیاز آبی سالانه قطعه از رابطه ۱۴ محاسبه شد:

$$ET_L = 0.794 \times 1.2 \times 1.0 \times 1286 \left(\frac{mm}{year} \right) = 1225 \left(\frac{mm}{year} \right) \quad (\text{رابطه ۱۴})$$

بر اساس مقدار کل آب مصرفی بر اساس رابطه ۱۰ برابر است با ۲/۶۹ مترمکعب بر مترمربع برسال. بر اساس برآورد نیاز آبی با روش LCM-WUCOLS طبق رابطه ۱۴، راندمان آبیاری برای قطعه ۴۸ شرح رابطه ۱۵ خواهد بود:

$$IE(\%)_{LCM-WUCOLS} = \frac{1225 (mm)}{2.69 (m) \times 1000 (mm)} \times 100 = 45.5 \% \quad (\text{رابطه ۱۵})$$

در صورت نبودن چمن، با فرض کاشت گیاهان با نیاز آبی متوسط طبق فهرست WUCOLS، در راستای حفظ عامل تراکم (k_d)، ضریب گونه‌ای از ۰/۷۹۶ به ۰/۶ کاهش یافته و مقدار آب موردنیاز برای آبیاری به شرح رابطه ۱۶ خواهد بود:

$$ET_L = 0.5 \times 1.2 \times 1.0 \times 1286 \left(\frac{mm}{year} \right) = 772 \left(\frac{mm}{year} \right) \quad (\text{رابطه ۱۶})$$

نتایج برآورد نیاز آبی با نرم‌افزار i-Tree Eco

در جدول ۷، متغیرهای هیدرولوژیکی محاسبه‌شده توسط نرم‌افزار i-Tree Eco به تفکیک هر گونه قابل مشاهده است. با توجه به مجموع ستون PET، نیاز آبی قطعه ۴۸ برابر با ۴۵۳۰/۵۷ مترمکعب در سال است. با تقسیم این مقدار به مساحت قطعه که ۴۳۴۳ مترمربع است، نیاز آبی هر مترمربع برای تمامی گونه‌ها و با عدم لحاظ چمن پوششی برابر با ۱۰۴۳ میلی‌متر در سال است. این مقدار در مقایسه با مقدار به دست آمده از روش LCM-WUCOLS طبق رابطه ۱۶، حدود ۲۶ درصد بیشتر است که نشان می‌دهد برآورد روش ضریب منظر ۲۷۳ میلی‌متر کمتر از مقدار گزارش شده توسط نرم‌افزار i-Tree Eco است.

جدول ۷- خروجی نرم‌افزار i-Tree Eco

گونه	تعداد	سطح برگ (m ²)	PET (L/yr)	تبخیر (L/yr)	تعرق (L/yr)	آب رهگیری شده (L/yr)	رواناب اجتناب شده (L/yr)
توت سفید	۱	۶	۶۱۳	۲۲	۷۶	۲۳	۴
ارس خننده ژاپنی	۱	۲۳	۶۷۳۳	۵۶۸	۶۵۹	۵۵۲	۱۱۱
زالزالک	۱	۲	۲۱۰	۸	۴۷	۸	۱
برگ بو	۱	۳۵۹	۱۰۵۶۲۱	۸۹۱۳	۲۰۶۸	۸۶۶۱	۱۷۴۶
سنجد	۱	۱۱	۱۱۲۸	۴۱	۸۶	۴۳	۷
سرو شیرازی	۱	۱۰۳	۳۰۳۱۴	۲۵۵۸	۲۲۲۶	۲۴۸۶	۵۰۱
کاج (ترکی)	۱	۲۹۵	۸۶۹۹۹	۷۳۴۲	۵۶۷۸	۷۱۳۴	۱۴۳۸
سیب	۳	۱۳	۱۳۳۱	۴۸	۲۴۶	۵۰	۹
بید مجنون	۳	۱۰۱۱	۱۰۴۶۰۲	۳۸۱۵	۲۳۳۶۲	۳۹۳۸	۶۸۰
سرو خمره‌ای	۳	۱۳	۳۷۵۳	۳۱۷	۳۶۷	۳۰۸	۶۲
به	۴	۱۹	۱۹۴۶	۷۱	۴۳۵	۷۳	۱۳
زردآلو	۴	۴۱	۴۲۳۵	۱۵۵	۵۲۶	۱۵۹	۲۸
سدروس	۴	۳۹۳	۱۱۵۸۰۹	۹۷۷۳	۸۵۰۳	۹۴۹۷	۱۹۱۴
هلو	۴	۲۷	۲۸۰۳	۱۰۲	۵۲۲	۱۰۶	۱۸
گیلاس	۵	۲۵	۲۵۸۹	۹۵	۵۷۸	۹۸	۱۷
آلبالو تلخ	۶	۵۲	۵۳۸۱	۱۹۶	۱۲۰۲	۲۰۳	۳۵
انار	۶	۱۳۴	۱۳۸۵۸	۵۰۶	۱۷۲۰	۵۲۲	۹۰
انجیر	۷	۳۶	۳۷۰۵	۱۳۵	۹۲	۱۴۰	۲۴
آلو	۱۰	۶۸	۷۰۱۱	۲۵۶	۱۵۶۶	۲۶۴	۴۶
یاس هلندی	۱۰	۴۷	۱۳۷۰۱	۱۱۵۶	۲۴۱۵	۱۱۲۴	۲۲۷
به ژاپنی	۱۲	۵۶	۵۷۴۱	۲۰۹	۷۱۳	۲۱۶	۳۷

۱۴۴۲۴	۷۱۵۷۵	۱۵۳۸۱۷	۷۳۶۵۹	۸۷۳۸۵۰	۲۹۶۴	۱۳	مگنولیا
۸۶	۴۲۳	۲۲۸	۴۳۷	۵۱۶۷	۱۸	۲۳	یوکاری وحشی
۲۰۰۸۱	۱۱۶۳۰۹	۶۸۹۹۳۰	۱۱۲۶۵۸	۳۰۸۹۰۷۰	۲۹۸۵۷	۵۲	چنار (شرقی)
۳۰۶	۱۷۱۴	۵۶۳۷	۱۶۵۲	۴۵۴۰۴	۴۳۵	۲۷۲	رز مهندسی
۴۱۹۰۳	۲۲۵۶۲۳	۹۰۲۶۹۸	۲۲۴۶۹۱	۴۵۳۰۵۶۳	۳۶۰۰۶	۴۴۸	جمع کل

تحلیل حساسیت و عدم قطعیت بر آورد نیاز آبی با روش LCM-WUCOLS

از آنجا که ضرایب سه گانه روش LCM به صورت ضربی و با توان یک در معادله بر آورد نیاز آبی وارد می شوند، بر آورد نیاز آبی از نظر ریاضی به هر سه ضریب وابستگی مستقیم دارد. با این حال، از آنجا که هر یک از ضرایب دارای دامنه انتخاب مشخصی هستند و انتخاب مقدار دقیق آن ها می تواند بر اساس شرایط پوشش گیاهی و قضاوت کارشناسی انجام شود، این انتخاب می تواند موجب ایجاد عدم قطعیت در بر آورد نیاز آبی شود. در این پژوهش، تحلیل حساسیت و عدم قطعیت بدون در نظر گرفتن چمن انجام شد تا نتایج با خروجی نرم افزار i-Tree Eco قابل مقایسه باشد. از آنجا که مطابق دستورالعمل LCM-WUCOLS، عامل خرد اقلیم (k_{mc}) برای پارک ها برابر با ۱ در نظر گرفته می شود، این ضریب در تحلیل حاضر ثابت فرض شد. عامل k_d نیز با توجه به قرارگیری پوشش گیاهی مورد مطالعه در طبقه تراکم زیاد، می تواند در بازه ۱/۱ تا ۳/۱ تغییر کند. همچنین، با توجه به اینکه بیشتر گونه های موجود در قطعه ۴۸ در فهرست WUCOLS در طبقه نیاز آبی متوسط (M) قرار دارند، عامل k_s در بازه ۰/۴ تا ۰/۶ در نظر گرفته شد. برای حالت پایه، مقدار میانی این بازه، یعنی ۰/۵، در نظر گرفته شد. بنابراین، با ثابت نگه داشتن k_{mc} و بررسی ترکیب های مختلف حداقل و حداکثر مقادیر k_d و k_s ، چهار سناریوی عدم قطعیت علاوه بر حالت پایه مطابق جدول ۸ تعریف شد.

جدول ۸- تغییرات نیاز آبی با توجه به بازه تغییرات عامل های روش LCM-WUCOLS

متغیر	سناریو			
	D	C	حالت پایه	B
k_s	۰/۶	۰/۶	۰/۵	۰/۴
k_d	۱/۳	۱/۱	۱/۲	۱/۳
k_{mc}	۱	۱	۱	۱
ET_L (mm)	۱۰۰۳	۸۴۹	۷۷۲	۶۶۹
درصد تغییرات ET_L	۳۰	۱۰	-	-۱۳

نتایج جدول ۸ نشان می دهد که انتخاب مقادیر مختلف ضرایب در دامنه های تعیین شده می تواند تغییر قابل توجهی در مقدار بر آورده شده نیاز آبی ایجاد کند. در حالت پایه، با انتخاب مقدار میانی، نیاز آبی برابر با ۷۷۲ میلی متر در سال بر آورد شد. در سناریو A، با کاهش هم زمان k_s و k_d به حداقل مقادیر، نیاز آبی به ۵۶۶ میلی متر در سال کاهش یافت که معادل ۲۷ درصد کمتر از حالت پایه است. در سناریو B، افزایش k_d به حداکثر مقدار آن، در حالی که k_s در حداقل مقدار قرار دارد، موجب افزایش نیاز آبی به ۶۶۹ میلی متر در سال شد؛ با این حال، این مقدار همچنان حدود ۱۳ درصد کمتر از حالت پایه است. در مقابل، در سناریو C، با فرض حد بالای بازه k_s و حد پایین k_d ، مقدار ET_L به ۸۴۹ میلی متر در سال رسید که ۱۰ درصد بیشتر از حالت پایه است. بیشترین مقدار نیاز آبی نیز در سناریو D، با انتخاب هم زمان بیشترین مقادیر k_s و k_d ، برابر با ۱۰۰۳ میلی متر در سال به دست آمد که ۳۰ درصد بیشتر از حالت پایه است. در مجموع، نتایج نشان می دهد که صرفاً تغییر مقادیر ضرایب در محدوده مجاز آن ها می تواند دامنه ای از ۵۶۶ تا ۱۰۰۳ میلی متر در سال برای نیاز آبی ایجاد کند؛ یعنی بر آورد نیاز آبی نسبت به حالت پایه ۷۷۲ میلی متر در سال می تواند حدود ۲۷ درصد کاهش تا ۳۰ درصد افزایش داشته باشد. این نتایج بیانگر آن است که قضاوت کارشناسی در انتخاب مقدار دقیق ضرایب، می تواند منبع قابل توجهی از عدم قطعیت در بر آورد نیاز آبی با روش LCM-WUCOLS باشد.

بحث

با وجود سادگی و کاربردپذیری روش LCM-WUCOLS در برآورد نیاز آبی فضای سبز، استفاده از این روش با محدودیت‌هایی همراه است. نخست، ضرایب مورد استفاده در این روش بر اساس شرایط اقلیمی و پوشش گیاهی کالیفرنیا تدوین شده‌اند و انتقال آن‌ها به مناطق دیگری مانند تهران می‌تواند موجب ایجاد عدم قطعیت در برآورد نیاز آبی شود. در همین راستا، قابلیت تعمیم روش به مناطقی که شرایط اقلیمی آن‌ها با هیچ‌یک از مناطق اقلیمی تعریف‌شده در WUCOLS شباهت مناسبی ندارد، محدود خواهد بود. از سوی دیگر، تعیین ضرایب پوشش گیاهی، تراکم و خرد اقلیم تا حدی به قضاوت کارشناسی وابسته است و انتخاب مقادیر متفاوت از دامنه‌های پیشنهادی می‌تواند نتایج متفاوتی ایجاد کند. محدودیت دیگر روش، عدم لحاظ مستقیم ویژگی‌های فردی و واقعی پوشش گیاهی، از جمله سن، ابعاد، وضعیت سلامت و شرایط رشد گیاهان است.

در میان محدودیت‌های مذکور، عدم لحاظ مستقیم ویژگی‌های فردی و واقعی پوشش گیاهی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است؛ زیرا حتی گیاهان متعلق به یک گونه یکسان، به دلیل تفاوت در سن، اندازه، سطح برگ، ابعاد تاج، وضعیت سلامت و شرایط رشد، لزوماً نیاز آبی یکسانی ندارند. در روش LCM-WUCOLS، این تفاوت‌ها عمدتاً از طریق یک k_s مشترک برای گروه‌های گیاهی بیان می‌شوند و در نتیجه، بخشی از تغییرپذیری واقعی نیاز آبی در سطح گیاه یا قطعه ممکن است در برآورد لحاظ نشود. در مقابل، رویکرد مبتنی بر i-Tree Eco با استفاده از اطلاعات واقعی مربوط به ساختار و وضعیت پوشش درختی، امکان در نظر گرفتن تفاوت‌های موجود میان گیاهان را فراهم می‌کند. از این منظر، مقایسه نتایج دو رویکرد در مطالعه حاضر نیز قابل توجه است؛ به‌طوری که حد بالای دامنه برآورد حاصل از تحلیل عدم قطعیت LCM-WUCOLS به مقدار برآوردشده توسط i-Tree Eco نزدیک است. این نزدیکی نشان می‌دهد که انتخاب مقدار k_s در LCM-WUCOLS می‌تواند نقش تعیین‌کننده‌ای در نزدیک شدن برآورد نیاز آبی به مقادیر حاصل از رویکردهای مبتنی بر ویژگی‌های واقعی پوشش گیاهی داشته باشد. بنابراین، استفاده از این روش ممکن است در برخی شرایط به کم‌برآوردی نیاز آبی منجر شود، در حالی که استفاده از مقادیر بالاتر دامنه پیشنهادی می‌تواند برآوردی نزدیک‌تر به شرایط واقعی پوشش گیاهی ارائه دهد.

مطالعات محدودی در راستای ارزیابی و مقایسه نتایج روش WUCOLS با سایر رویکردهای برآورد نیاز آبی انجام شده است. Snyder et al. (2015) با اشاره به ماهیت تجربی و تا حدی ذهنی ضرایب WUCOLS، به‌ویژه k_s ، بیان کردند که اعتبارسنجی مستقیم این ضرایب با داده‌های میدانی با محدودیت‌هایی مواجه است. در مطالعه‌ای مشابه برای برآورد آب مورد نیاز فضای سبز شهری، نتایج پژوهش بهروزی و همکاران (۱۴۰۴) نشان داد که رویکرد LCM-WUCOLS عملکرد مناسبی داشته و نیاز آبی را حدود ۵ درصد کمتر از مقدار آب واقعی مصرفی برآورد کرده است. در پژوهش دیگری توسط سجودی و میرزایی (۱۳۹۹)، مقایسه روش LCM-WUCOLS با روش بیلان آبی، نشان داد که علیرغم عملکرد مناسب این روش، مقدار نیاز آبی برآوردشده توسط آن کمتر از مقدار اندازه‌گیری شده است. این اختلاف برای سطوح معناداری ۱۰٪/۰/۵ معنی‌دار نبود اما برای سطوح معنی‌داری ۰/۵٪ معنادار بوده است. همچنین Nouri et al., (2013b) با مقایسه سه روش IPOS، PF و LCM-WUCOLS، روش مبتنی بر WUCOLS را به عنوان بهترین روش در برآورد نیاز آبی فضای سبز در پارکی در استرالیا معرفی کردند اما اذعان داشتند که برآورد WUCOLS از مقدار واقعی آبی که برای حفظ سلامت و ظاهر گیاهان در نظر گرفته شده، کمتر است. در مطالعه Shojaei et al. (2018) که برای استان اصفهان در ایران انجام شد، برآوردهای LCM-WUCOLS و LIMP برای یک باغ گیاه‌شناسی و یک پارک جنگلی تنک مقایسه شدند. نتایج نشان داد که برآورد LCM-WUCOLS به ترتیب حدود ۵ و ۴۴ درصد کمتر از LIMP بوده است. این نتایج نشان می‌دهد که میزان انطباق برآورد LCM-WUCOLS حتی برای یک اقلیم مشابه ولی پوشش گیاهی و ساختار فضای سبز متفاوت، می‌تواند اختلاف قابل توجهی داشته باشد.

در پژوهش حاضر نیز برآورد روش LCM-WUCOLS در بازه ۵۶۶ تا ۱۰۰۳ میلی‌متر قرار گرفت. حد پایین این برآورد در مقایسه با مقدار ۱۰۴۳ که برآورد نرم‌افزار i-Tree Eco براساس مشخصات پوشش گیاهی است، فاصله چشمگیری دارد اما حد بالای آن همسو با نتایج تحقیقات پیشین، به نیاز آبی گیاهان نزدیک است. با توجه به نتایج مطالعات پیشین و یافته‌های پژوهش حاضر، به نظر می‌رسد استفاده از WUCOLS می‌تواند برای برآورد اولیه نیاز آبی فضای سبز مفید باشد، اما پیش از تعمیم

گسترده آن به مناطق دارای شرایط اقلیمی و پوشش گیاهی متفاوت، لازم است ضرایب آن، به ویژه k_s ، متناسب با شرایط فضای سبز مورد بررسی قرار گیرند. در این راستا، استفاده از رویکردهای مبتنی بر اندازه‌گیری‌های میدانی، مانند LIMP، که با استفاده از اندازه‌گیری‌های میدانی تبخیر-تعرق نیاز آبی فضای سبز را برآورد می‌کند، می‌تواند برای ارزیابی و تنظیم ضرایب WUCOLS و افزایش اطمینان از برآورد نیاز آبی توصیه شود. اما نکته حائز اهمیت این است که برآورد صحیح نیاز آبی برای دستیابی به کاهش مصرف کافی نیست و میزان مصرف در نهایت به برنامه‌ریزی و راندمان آبیاری وابسته است. مقایسه برآورد روش LCM-WUCOLS و آب مصرفی در واقعیت، راندمان ۴۵ درصدی را نشان می‌دهد. این مقدار با تدوین یک برنامه آبیاری مناسب قابل ارتقاء بوده و لازم است تا نسبت به کاهش مصرف آب اقدام گردد.

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

نتایج این پژوهش نشان داد که روش LCM-WUCOLS، با وجود سادگی و قابلیت کاربرد مناسب در برآورد نیاز آبی فضای سبز شهری، نسبت به نحوه انتخاب ضرایب گونه‌ای و تراکم پوشش حساس است و قضاوت کارشناسی در تعیین این ضرایب می‌تواند عدم قطعیت قابل توجهی در نتایج ایجاد کند. نیاز آبی سالانه قطعه ۴۸ پارک شهر با در نظر گرفتن پوشش موجود، که بخش عمده آن را چمن تشکیل می‌دهد، برابر ۱۲۲۵ میلی‌متر برآورد شد و مقایسه آن با آب اعمال شده، راندمان آبیاری حدود ۴۵/۵ درصد را نشان داد که بیانگر ظرفیت قابل توجه برای اصلاح برنامه و کاهش مصرف آب است. در تحلیل بدون چمن، مقدار پایه نیاز آبی LCM-WUCOLS برابر ۷۷۲ میلی‌متر بود و با تغییر ضرایب در محدوده مجاز، دامنه‌ای بین ۵۶۶ تا ۱۰۰۳ میلی‌متر به دست آمد؛ در حالی که i-Tree Eco بر اساس ویژگی‌های واقعی پوشش گیاهی مقدار ۱۰۴۳ میلی‌متر را برآورد کرد. نزدیکی حد بالای دامنه LCM-WUCOLS به نتیجه i-Tree Eco نشان می‌دهد که انتخاب مناسب و کالیبراسیون محلی ضرایب می‌تواند دقت این روش را افزایش دهد. بنابراین پیشنهاد می‌شود پیش از تعمیم LCM-WUCOLS به سایر فضاهای سبز تهران، ضرایب آن با داده‌های میدانی و شرایط اقلیمی و پوشش گیاهی محلی صحت‌سنجی شوند. همچنین، اصلاح زمان‌بندی و مدیریت سامانه آبیاری، تفکیک نواحی آبیاری بر اساس نیاز آبی گونه‌ها و کاهش سهم چمن و سایر گونه‌های پرآبر می‌تواند به افزایش راندمان آبیاری و کاهش مصرف آب در فضای سبز شهری منجر شود.

منابع

انصاری قوجقار، محمد، پارسا، احسان، لیاقت، عبدالمجید، و سلاجقه، علی. (۱۴۰۰). ارزیابی روش‌های برآورد نیاز آبی گیاهان فضای سبز شهری. *پژوهش‌های اقلیم‌شناسی*، ۱۴۰۰(۴۶)، ص ۵۶-۴۳.

بابائیان، ایمان، انصاری قوجقار، محمد، پورغلام آمیجی، مسعود، و پارسا، احسان. (۱۳۹۹). محاسبه نیاز آبی فضای سبز شهری با استفاده از روش کالیفرنیا. *نیوار*، ۴۴(۱۱۰-۱۱۱)، ص ۱۵۶-۱۴۱.

بهروزی، محمود، نوحه گر، احمد، و حسن زاده، پانیسا. (۱۴۰۴). برآورد نیاز آبی فضای سبز در منظر شهری جزیره کیش. *مهندسی اکوسیستم بیابان*، ۱۴(۴۶)، ص ۳۵-۴۸.

سجودی، زینب، و میرزایی اصلی، فرهاد، (۱۳۹۹). تعیین نیاز آبی گیاهان فضای سبز شهری. *مدیریت آب و آبیاری*، ۱۰(۱)، ص ۱۴۱-۱۳۱.

References

Alazba, A. A., Mattar, M. A., El-Shafei, A., Ezzeldin, M., Radwan, F., & Alrdyan, N. (2025). Water Demand Determination for Landscape Using WUCOLS and LIMP Mathematical Models. *Water*, 17(10), 1429.

Ansari Ghoghhar, M., Parsi, E., Liaghat, A., & Salajeghe, A. (2021). Evaluation of methods for estimating water needs of urban green space plants. *Journal of Climate Research*, 1400(46), 43-56 (In Persian)

Babaeian, I., Ansari, G. M., Pourgholam, A. M., & Parsi, E. (2020). Calculate the Water Need of Urban Green Space Using the California Method (Case Study: Region 4 of Tehran Municipality) *Nivar*, 44(110-111), 141-156 (In Persian).

Behrouzi, M., Nohegar, A., & Hassanzadeh, P. (2025). Estimation of Water Requirements for Urban Green Infrastructures in Kish Island. *Desert Ecosystem Engineering*, 14(46), 35-48 (In Persian).

Costello, L. R., Matheny, N. P., Clark, J. R., & Jones, K. S. (2000). A guide to estimating irrigation water needs of landscape plantings in California: The landscape coefficient method and WUCOLS III. University of California Cooperative Extension; California Dept. of Water Resources; U.S. Bureau of Reclamation.

Gasser, L., Le Gall, F., & Abily, M. (2024). Water efficiency in smart cities: Optimising irrigation for public green spaces. *LHB*, 110(1), 2294076.

Hassanvand, M. R., Salimi, A. H., Kisi, O., Omidvar Mohammadi, H., & Abouzari, N. (2021). Investigating application of adaptive neuro fuzzy inference systems method and Epanet software for modeling green space water distribution network. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, 45(4), 2765-2777.

Hirabayashi, S. (2015). i-Tree Eco United States county-based hydrologic estimates. US Department of Agriculture Forest Service, Pacific Southwest Research Station, Center for Urban Forest Research: Washington, DC, USA.

Hui, C. X., Dan, G., Alamri, S., & Toghraie, D. (2023). Greening smart cities: An investigation of the integration of urban natural resources and smart city technologies for promoting environmental sustainability. *Sustainable Cities and Society*, 99, 104985.

Jang, C. S., Kuo, Y. M., & Chen, S. K. (2019). Assessment of shallow groundwater use for irrigating park trees in the metropolitan Taipei Basin according to variability conditions of water quality. *Journal of Hydrology* x, 2, 100013.

Javadinia, M., Izanloo, N., Yousefi, H., & Fathi, A. (2025). Energy-Based Model for Designing and Managing Water Resources in Park Green Space Irrigation. *Journal of Energy Management and Technology*, 9(2), 91-101.

Kumar, A., Ekka, P., Upreti, M., Shilky, & Saikia, P. (2023). Urban green spaces for environmental sustainability and climate resilience. In *The palgrave handbook of socio-ecological resilience in the face of climate change: Contexts from a developing country* (pp. 389-409). Singapore: Springer Nature Singapore.

Martins, B. (2022). Where to construct new urban green spaces to be at the recommended distance from users and to complement existing ones? A study in five cities of northern Portugal. *Urban Forestry & Urban Greening*, 72, 127571.

Nouri, H., Beecham, S., Kazemi, F., & Hassanli, A. M. (2013a). A review of ET measurement techniques for estimating the water requirements of urban landscape vegetation. *Urban Water Journal*, 10(4), 247-259.

Nouri, H., Beecham, S., Hassanli, A. M., & Kazemi, F. (2013b). Water requirements of urban landscape plants: A comparison of three factor-based approaches. *Ecological Engineering*, 57, 276-284.

Pereira, L. S., Paredes, P., Hunsaker, D. J., López-Urrea, R., & Shad, Z. M. (2021). Standard single and basal crop coefficients for field crops. Updates and advances to the FAO56 crop water requirements method. *Agricultural Water Management*, 243, 106466.

Qin, Y., & Horvath, A. (2020). Use of alternative water sources in irrigation: potential scales, costs, and environmental impacts in California. *Environmental Research Communications*, 2(5), 055003.

Santos, C., Taveira-Pinto, F., Pereira, D., & Matos, C. (2021). Analysis of the water–energy nexus of treated wastewater reuse at a municipal scale. *Water*, 13(14), 1911.

Santos, L., Brás, I., Ferreira, M., Domingos, I., & Ferreira, J. (2024). Life cycle assessment of green space irrigation using treated wastewater: a case study. *Sustainability*, 16(13), 5696.

Sapkota, M., Arora, M., Malano, H., Moglia, M., Sharma, A., & Pamminger, F. (2018). Understanding the impact of hybrid water supply systems on wastewater and stormwater flows. *Resources, Conservation and Recycling*, 130, 82-94.

Shojaei, P., Gheysari, M., Nouri, H., Myers, B., & Esmaeili, H. (2018). Water requirements of urban landscape plants in an arid environment: The example of a botanic garden and a forest park. *Ecological engineering*, 123, 43-53.

Snyder, R. L., Pedras, C., Montazar, A., Henry, J. M., & Ackley, D. (2015). Advances in ET-based landscape irrigation management. *Agricultural Water Management*, 147, 187-197.

Sojoodi, Z. & Mirzaei, F. (2020). Determination of water requirement of urban Landscape plants. *Water and Irrigation Management*, 10(1), 131-141 (In Persian).