

جانمایی حوضچه‌های ذخیره با استفاده از مدل شبیه‌ساز SWMM و تصمیم‌گیری چندمعیاره مکانی

ابراهیم احمدی شرف^۱ مسعود تجربی^۲

(دریافت ۹۱/۱۱/۹ پذیرش ۹۲/۵/۲۶)

چکیده

حوضچه‌های ذخیره یکی از روش‌های سازه‌ای کنترل سیلاب در محیط‌های شهری هستند. اگرچه تأثیر مثبت این سازه‌ها در کنترل سیلاب امری بدیهی است، اما برخی از تحقیقات نشان داده‌اند که استفاده از آن‌ها در مکان‌های نامناسب می‌تواند باعث بدتر شدن وضعیت سیلاب یک حوضه شود. در این مقاله، روشی ابتکاری ارائه شد که در آن از نتایج مدل‌سازی هیدرولوژیکی-هیدرولیکی برای جانمایی حوضچه‌ها به منظور کنترل سیلاب به صورت مستقیم استفاده می‌شود. حوضه در که در شهر تهران به عنوان مورد مطالعه انتخاب شد. برای جانمایی حوضچه، معیارهای مختلفی از جمله هیدرولوژیکی، فیزیوگرافی و اقتصادی در نظر گرفته شد. مدل SWMM برای شبیه‌سازی‌های هیدرولوژیکی-هیدرولیکی به کار گرفته شد تا وضعیت شبکه موجود در مقابله با سیلاب ارزیابی شود. نتایج مدل‌سازی، شامل نقاط آب گرفتگی و آبنمودهای جریان به عنوان پارامترهای ورودی به ساختار تصمیم‌گیری چند معیاره مکانی در نظر گرفته شدند. در این ساختار، از فرایند تحلیل سلسله مراتبی به عنوان ساختار تصمیم‌گیری و از سیستم اطلاعات جغرافیایی به عنوان ابزار تحلیل مکانی استفاده شد. خروجی حاصله نقشه‌ای بود که میزان تناسب هر نقطه از حوضه مورد مطالعه را برای احداث حوضچه‌های ذخیره نشان داد. با الگوریتم ارائه شده، می‌توان روند جانمایی این تأسیسات و سایر BMPها را در سطح یک شهر بهبود بخشید.

واژه‌های کلیدی: حوضچه‌های ذخیره، جانمایی، فرایند تحلیل سلسله مراتبی، SWMM، کنترل سیلاب شهری

Siting Detention Basins Using SWMM and Spatial Multi-Criteria Decision Making

E. Ahmadisharaf¹

M. Tajrishy²

(Received Jan. 28, 2013 Accepted Aug. 17, 2013)

Abstract

Detention basins are one of the structural measures for floodwater control in urban environments. They are effective tools in flood mitigation, but some studies have shown that they may aggravate the condition if not properly sited. This study presents an innovative approach which directly incorporates hydrologic-hydraulic modeling results to the site selection procedure for flood control detention basins. Darakeh Catchment located in Tehran is selected as the case study. Hydrologic, physiographic, and economic parameters are considered as siting criteria. SWMM model is employed for simulating hydrologic-hydraulic processes and evaluating the current drainage network against low-frequent storms. Modeling results, including flooded junctions and the flow hydrographs, are used as input parameters to the spatial decision making framework. The framework employs Analytical Hierarchy Process (AHP) as the decision making structure and geographic information system (GIS) as the spatial analyst tool. The output is a raster map which shows each cell potential for the placement of the detention basin. The proposed approach aims to improve the siting procedure based on these measures and other BMPs in an urban environment.

Keywords: Detention Basins, Site Selection, AHP, SWMM, Urban Flood Control.

1. Grad. M.Sc. of Water and Civil Eng., Sharif University of Tech., Tehran
2. Assoc. Prof., Dept. of Civil Eng., Water and Environmental Studies
Office, Sharif University of Tech., Tehran (Corresponding Author) (+98
21) 66036016 tajrishy@sharif.edu

۱- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد مهندسی عمران- آب، دانشگاه صنعتی شریف، تهران
۲- دانشیار، دانشکده مهندسی عمران و دفتر مطالعات آب و محیط زیست، دانشگاه
صنعتی شریف، تهران (نویسنده مسئول) ۶۶۰۳۶۰۱۶ (۰۲۱)
tajrishy@sharif.edu

تاکنون مطالعات زیادی در مورد جانمایی روش های BMP انجام گرفته است. در اکثر تحقیقات صورت گرفته، معیارهای هیدرولوژیکی، محیط زیستی و اقتصادی بیشتر مورد توجه قرار گرفته اند. از این میان می توان به مطالعه پالمری و ترپل در سال ۲۰۰۲ اشاره کرد که برای جانمایی و برآورد اندازه تالاب از GIS استفاده کردند و پنج معیار اصلی هیدرولوژیکی، هواشناسی، زمین شناسی، محیط زیستی و اجتماعی - اقتصادی را در نظر گرفتند [۱۱]. تصمیم گیری چندمعیاره مکانی (ترکیب GIS و تصمیم گیری چند معیاره) از اواخر دهه هشتاد میلادی و به موازات توسعه GIS، در حل مسائل مختلف مورد توجه قرار گرفته است. توسعه GIS امکان حل مسائل تعیین تناسب کاربری زمین با تحلیل های پیچیده تر و انجام مدل سازی را فراهم ساخت. از نخستین تحقیقاتی که با استفاده از ابزار GIS انجام شد، می توان به مطالعه کی و همکاران در سال ۱۹۹۳ اشاره کرد که به منظور پهنه بندی نواحی مناسب برای دفن زباله انجام گرفت [۱۲]. پس از آن، از ترکیب این دو ابزار به صورت گسترده برای تعیین نقشه های تناسب اراضی در موضوعات مختلف استفاده شده است. مطالعات کاج و سیمونوویچ در سال ۱۹۹۷ برای ارزیابی سناریوهای مختلف کنترل سیلاب و میر و همکاران در سال ۲۰۰۹ برای پهنه بندی ریسک سیل از جمله مطالعات مهم در عرصه منابع آب به شمار می روند [۱۳ و ۱۴]. مطالعه شاه منصور و همکاران در سال ۲۰۰۸ به منظور جانمایی تصفیه خانه های فاضلاب و ارزیابی گزینه های مختلف تصفیه با استفاده از روش AHP و GIS، از جمله مطالعات انجام شده با استفاده از تصمیم گیری چندمعیاره مکانی در ایران است [۱۵].

به منظور در اختیار داشتن یک ارزیابی سیستماتیک، برخی از مطالعات نیز سعی در توسعه ساختارهای تصمیم گیری برای جانمایی BMPها داشته اند. یکی از آنها ساختار پشتیبان تصمیم گیری BMPDSS^۳ است که توسط بخش منابع محیط زیست شهرستان پرنس جورج آمریکا در سال ۲۰۰۵ ارائه شده که یک ابزار تصمیم گیری برای جانمایی BMPها بر اساس مدل سازی های هیدرولوژیکی، هیدرولیکی و کیفی است [۱۶]. مدل SUSTAIN^۴ نمونه ای دیگر است که توسط آژانس حفاظت محیط زیست آمریکا^۵ به منظور شبیه سازی، جانمایی و بهینه سازی BMPهای مختلف تهیه شده است [۱۷]. یانگ و همکاران در سال ۲۰۰۹ الگوریتم AHP^۶ را برای انتخاب بهینه BMPها در استراتژی های مختلف کمی و کیفی مدیریت رواناب شهری به کار بردند. الگوریتم

سیل یکی از بلاهای طبیعی است و پس از زلزله بیشترین میزان خسارت را در جهان به خود اختصاص می دهد [۱]. همچنین بیش از نیمی از خسارات سیل در دنیا در آسیا اتفاق می افتد [۲]. علی رغم توجه زیادی که تاکنون به پدیده سیلاب در نواحی غیرشهری شده است، توجه به این رخداد در شهرها از سابقه ای طولانی برخوردار نیست [۳]. به خصوص در کشورهای در حال توسعه مانند ایران، برنامه ریزی کنترل سیل شهری توسط مؤسسات دولتی و بدون مشارکت نهادهای خصوصی و مردم انجام شده که عمدتاً از هماهنگی مناسبی نیز برخوردار نیستند. این امر می تواند از جنبه های مختلف به پیشرفت و توسعه شهرها نیز آسیب برساند و روند رشد آنها را با تأخیر مواجه سازد [۲].

پیشرفت های اخیر در توسعه روش های نوین مدیریت رواناب شهری، طیف وسیعی از گزینه های سازه ای و غیرسازه ای مانند توسعه کم اثر^۱ و بهترین راهکار مدیریتی^۲ را در اختیار مدیران و برنامه ریزان شهری قرار داده است [۴]. یکی از مسائل مهم در به کارگیری این روش ها، تعیین مکان های مناسب برای احداث آنها با توجه به معیارهای مختلف است. محل اجرای این تکنیک ها روی میزان اوج و حجم جریان تأثیرگذار بوده و احداث آنها در مکان های نامناسب می تواند منجر به بدتر شدن سیستم دفاع سیلاب موجود شود [۵-۷]. میزان تأثیر روش های مذکور روی مقدار رواناب در دوره های بازگشت مختلف متفاوت است. برای مثال به کارگیری LID تنها در دوره های بازگشت کوچک مؤثر بوده و در دوره های بازگشت بزرگ تأثیر ناچیزی روی مقدار رواناب می گذارند [۷ و ۸]. حوضچه های ذخیره یکی از روش های مؤثر کنترل سیلاب است که در دوره های بازگشت بالا نیز روی کنترل سیلاب مؤثر است [۹].

کاربردهای مختلف BMPها، مسئله انتخاب مکان مناسب احداث آنها را به مسئله تصمیم گیری چند معیاره تبدیل کرده است. بنابراین برای جانمایی و گرفتن نتایج صحیح به تشکیل یک ساختار تصمیم گیری قوی نیاز است. فرایند تحلیل سلسله مراتبی که توسط ساعتی در سال ۱۹۸۰ معرفی شد، الگوریتمی ساده و انعطاف پذیر برای حل مسائل پیچیده تصمیم گیری چند معیاره است [۱۰]. این روش قادر به وارد کردن تعداد نامحدودی از عوامل با دیمانسیون های مختلف به ساختار تصمیم گیری است. GIS نیز با توجه به قابلیت بهنگام سازی، مدیریت و تحلیل داده های مکانی و توصیفی حاصل از منابع مختلف می تواند به عنوان پشتیبان تصمیم گیری به کار گرفته شود.

³ Best Management Practices Decision Support System

⁴ System for Urban Stormwater Treatment and Analysis Integration

⁵ United States Environmental Protection Agency (USEPA)

⁶ Analytical Hierarchy Process (AHP)

¹ Low-Impact Development (LID)

² Best Management Practices (BMP)

برای استفاده از این قالب، روابط شدت-مدت-فراوانی، نقشه‌های کاربری اراضی، نفوذپذیری خاک، توپوگرافی و مقاطع عرضی کانال‌های واقع شده در منطقه مورد مطالعه بودند.

۲-۱- مدل‌سازی شبکه زهکشی موجود

فرایندهای هیدرولوژیکی و هیدرولیکی شبیه‌سازی شده در این مطالعه با توجه به اهداف آن به ترتیب بارش-رواناب و روندیابی جریان بود. این شبیه‌سازی‌ها با به‌کارگیری مدل SWMM انجام شد. روش SCS^۲ با توجه به سادگی و نیاز به داده‌های کم برای فرایند بارش-رواناب و موج دینامیکی با توجه به دقت بالای آن و استفاده از معادلات یک بعدی سن و نان به‌عنوان روش روندیابی جریان انتخاب شد [۱۹].

۲-۲- تشکیل ساختار تصمیم‌گیری

در این مطالعه از یک ساختار تصمیم‌گیری مکانی برای جانمایی حوضچه‌ها استفاده شد. در ساختار مزبور، AHP به‌عنوان روش تصمیم‌گیری چندمعیاره و GIS به‌عنوان ابزار تحلیل مکانی به‌کار گرفته شد. نرم‌افزار ArcGIS برای تحلیل‌های GIS و نرم‌افزار اکسپرت چویس^۳ برای پیاده‌سازی الگوریتم AHP استفاده شد. معیارهای تصمیم‌گیری از جنبه‌های هیدرولیکی، هیدرولوژیکی، هیدروژئولوژیکی، هزینه ساخت، سهولت اجرا و اجتماعی-اقتصادی انتخاب شدند. هفت معیار کنترل سیل، نفوذپذیری سطح، تغذیه آب‌های زیرزمینی، دسترسی به زمین، فاصله از آبراه‌ها، شیب سطح و فاصله از مناطق حساس به لحاظ اجتماعی-اقتصادی به‌عنوان عوامل تصمیم‌گیری برگزیده شدند. ذکر نکات زیر در مورد این معیارها ضروری است:

معیارهای مذکور با توجه به شرایط محدوده مطالعه می‌توانند تغییر کنند. برای مثال مناطق دارای اهمیت اجتماعی-اقتصادی در یک حوضه، کاملاً به ویژگی‌های آن وابسته است.

CN^۴ با توجه به در نظرگیری توأم خصوصیات خاک و کاربری اراضی به‌عنوان شاخص نفوذپذیری سطح در نظر گرفته شد [۲۰]. اولویت‌بندی مناطق مختلف بر اساس معیار کنترل سیل با تحلیل نتایج حاصل از مدل‌سازی‌های هیدرولوژیکی و هیدرولیکی حاصل انجام شد. در مناطقی که تراز آب زیرزمینی پایین بود، احداث حوضچه در اولویت قرار گرفت. در مورد معیار دسترسی به زمین، با توجه به این که اجرای حوضچه‌ها به دو شکل زمینی و زیرزمینی مورد توجه قرار می‌گیرد، اراضی باز و بایر، فضاهای سبز و

مذکور قادر به اولویت‌بندی BMP‌های مختلف برای اهداف گوناگون بود [۴]. در مطالعه دیگری، یانگ و همکاران در سال ۲۰۱۱ با استفاده توأم از الگوریتم مزبور و GIS، BMP‌های مناسب برای زیرحوضه‌های مختلف یک حوضه شهری را تعیین کردند [۱۸]. با این وجود، تاکنون در ساختارهای ارائه شده از نتایج مدل‌سازی هیدرولوژیکی-هیدرولیکی به‌طور مستقیم استفاده نشده است.

روند متداول برای جانمایی BMP‌ها شامل دو بخش عمده است: (۱) تحلیل شبکه زهکشی موجود با استفاده از یک مدل هیدرولوژیکی-هیدرولیکی؛ و (۲) طراحی ساختار تصمیم‌گیری. هرچند این دو بخش به‌صورت همزمان انجام نشده و ارتباط مستقیمی میان آن‌ها وجود ندارد.

این مطالعه روشی ابتکاری بود که در آن از نتایج مدل‌سازی هیدرولوژیکی-هیدرولیکی برای جانمایی حوضچه‌ها به‌منظور کنترل سیلاب به‌صورت مستقیم استفاده شد. این روش می‌تواند فرایند برنامه‌نویسی جانمایی حوضچه‌ها و یا سایر BMP‌ها را نیز تسهیل و مدت زمان تصمیم‌گیری را کوتاه سازد؛ زیرا پس از انجام مدل‌سازی هیدرولوژیکی-هیدرولیکی، نتایج می‌تواند به سادگی تحلیل شده و وارد ساختار تصمیم‌گیری شود. با توجه به هدف اصلی این مقاله مبنی بر کنترل سیلاب‌های شدید، حوضچه‌ها با توجه به اثبات قابلیت کاهش پیک جریان در مطالعات پیشین و سیلاب‌های دارای دوره‌های بازگشت بالا انتخاب شدند [۹] و [۱۸]. شبیه‌سازی‌های مذکور توسط مدل SWMM^۱ انجام شد. با تحلیل نتایج حاصل، امتیازدهی در مقیاس AHP (۱-۹) به اراضی حوضه داده می‌شود. این نتایج به‌عنوان یک عامل در کنار سایر معیارهای تصمیم‌گیری برای تهیه نقشه پهنه‌بندی نواحی مناسب احداث حوضچه‌های ذخیره استفاده شد. برای هر معیار، یک لایه GIS تهیه شده و نهایتاً نقشه پهنه‌بندی نواحی مناسب برای احداث حوضچه‌های ذخیره تهیه شد. ساختار تصمیم‌گیری چند معیاره مکانی ارائه شده روی حوضه درکه در تهران که یک حوضه متراکم شهری است، به‌کار گرفته شد. هدف روش ارائه شده، طرح بحثی جدید در عرصه جانمایی و استفاده بهینه از BMP‌ها به‌منظور کنترل سیلاب شهری در بین برنامه‌ریزان بود.

۲- روش تحقیق

در این تحقیق، ساختاری تحلیلی برای جانمایی حوضچه‌ها ارائه شد. ساختار مذکور شامل دو بخش اصلی بود: (۱) مدل‌سازی شبکه زهکشی موجود؛ (۲) تشکیل ساختار تصمیم‌گیری. اطلاعات اولیه

² Soil Conservation Service

³ Expert Choice

⁴ Curve Number

¹ Storm Water Management Model (SWMM)

جدول ۱- امتیاز کاربری‌های اراضی مختلف بر حسب میزان دسترسی

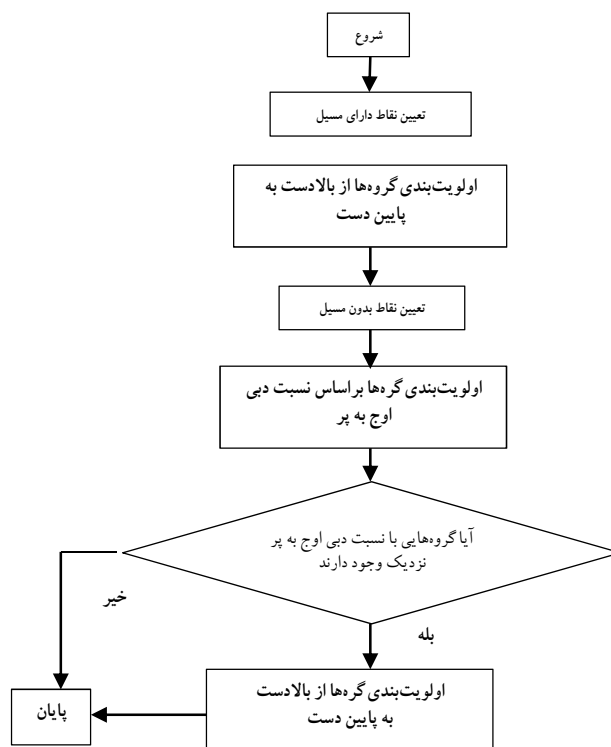
کاربری	فضای سبز	ورزشی	اراضی باز و بایر	مذهبی	تأسیسات شهری	اداری	فرهنگی	بهداشتی درمانی	کوهستانی	مسکونی
امتیاز	۹	۹	۹	۷	۷	۷	۷	۳	۳	۱

سیل‌گرفتنی، موقعیت مکانی در شبکه (بالادست یا پایین دست)، دبی اوج و پرکانال و زمان رسیدن به دبی اوج انجام شد. الگوریتم مورد استفاده به این صورت بود که ابتدا گره‌هایی که دچار سیل‌گرفتنی شده‌اند، تعیین شوند. این نقاط نسبت به سایرین دارای اولویت هستند. در بین این گره‌ها، گره‌ای که نسبت به سایرین در بالادست حوضه قرار گرفته، دارای ارجحیت است؛ چون در حالت سیلابی، جریان عمدتاً فوق بحرانی بوده و شرایط هیدرولیکی آن روی نقاط پایین دست مؤثر است. در بین گره‌های فاقد سیل‌گرفتنی، ابتدا گره‌هایی که در آن‌ها نسبت دبی اوج به ظرفیت مقطع بیشتر است، در اولویت قرار می‌گیرند. در بین دو گره با نسبت مساوی دبی اوج به پر، گره‌ای که نسبت به سایرین در بالادست قرار دارد، ارجحیت دارد. در نهایت گره‌ای که زودتر به مقدار اوج جریان می‌رسد، از اولویت برخوردار است. شکل ۱ شماتیک الگوریتم ارائه شده در این مطالعه را نشان می‌دهد.

بعد از پیاده‌سازی این الگوریتم روی تمام گره‌های موجود در شبکه و بر حسب میزان بحرانی بودن شرایط در آن‌ها، به هر گره امتیازی بین ۱ تا ۹ (مقیاس AHP) داده شد. این امتیاز به حوضه آن گره نسبت داده می‌شود. منظور از حوضه گره، مجموع اراضی است که روانابشان به آن گره تخلیه می‌شود. اگر مناطقی بین حوضه دو گره مشترک بود، امتیاز پایین‌تر برای آن‌ها در نظر گرفته می‌شود. به این ترتیب هر پیکسل از حوضه دارای امتیازی مربوط به معیار کنترل سیل خواهد بود.

۳- مطالعه موردی

حوضه رودخانه درکه که در غرب تهران واقع شده، برای پیاده‌سازی روش ارائه شده انتخاب شد. این محدوده مساحتی معادل ۵۵ کیلومتر مربع داشته که ۲۳ کیلومترمربع آن شهری و مابقی غیرشهری (کوهستانی) است. مجموع طول آبراه‌های این حوضه تقریباً ۳۳ کیلومتر است. برای کنترل سیل تنها از سیستم کانال‌ها و بدون استفاده از هیچ‌گونه رویکرد نوینی (LID یا BMP) استفاده می‌شود. شکل ۲ موقعیت این منطقه را نسبت به تقسیم‌بندی‌های شهرداری تهران نشان می‌دهد. همان گونه که از این شکل پیداست، بخش شهری محدوده مطالعه بسیار متراکم است. لازم به توضیح است که در این شکل، فقط کاربری‌های عمده، شامل کوهستانی،



شکل ۱- شماتیک الگوریتم ارائه شده برای ایجاد ارتباط بین نتایج شبیه‌سازی و ساختار تصمیم‌گیری چندمعیاره

کاربرهای ورزشی که بالاترین اولویت را برای اجرای زمینی داشتند، در رتبه اول و کاربری‌های تحت تملک شهرداری و دولت که دارای پتانسیل بالا برای اجرای زیرزمینی بودند، در رتبه بعدی قرار گرفتند. کاربری‌های مسکونی نیز کمترین امتیاز را به خود اختصاص می‌دهند. امتیاز کاربری‌های مختلف نهایتاً در جدول ۱ خلاصه شده است.

۳-۲- ایجاد ارتباط بین نتایج شبیه‌سازی و ساختار تصمیم‌گیری

در این مطالعه، الگوریتمی جدید به منظور وارد کردن نتایج شبیه‌سازی به ساختار تصمیم‌گیری ارائه شد. روش به این صورت است که ابتدا اولویت بندی بین گره‌ها انجام گرفت و سپس اولویت آن‌ها به حوضه متناظرشان نسبت داده شد. تعیین ارجحیت گره‌های موجود در آبراه اصلی حوضه، به ترتیب با در نظر گرفتن شش عامل وجود یا عدم سیل‌گرفتنی، زمان شروع سیل، مدت

هریک، اعداد ۱ (پایین ترین اولویت)، ۳، ۵، ۷ یا ۹ (بالا ترین اولویت) نسبت داده شد.

۴- نتایج و بحث

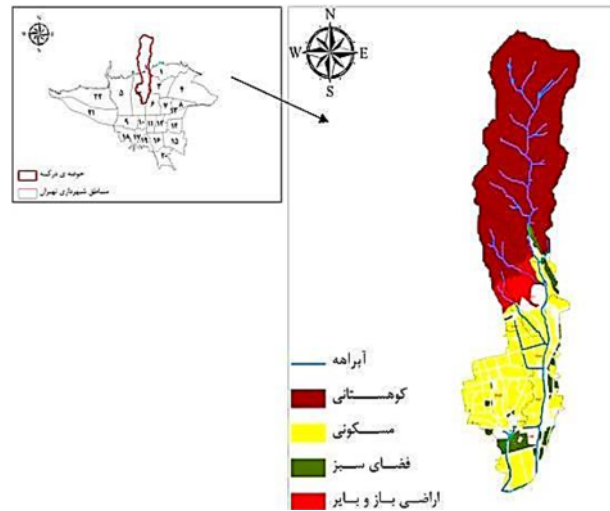
در این بخش، ساختار تصمیم‌گیری مکانی ارائه شده روی حوضه رودخانه درکه که به‌عنوان مورد مطالعه انتخاب شده بود، اجرا شد. پیاده‌سازی این الگوریتم در دو بخش اصلی مدل‌سازی هیدرولوژیکی و هیدرولیکی شبکه زهکشی موجود و تشکیل ساختار تصمیم‌گیری انجام شد.

۴-۱- مدل‌سازی شبکه زهکشی موجود

گام اول در به‌کارگیری روش ارائه شده، مدل‌سازی هیدرولوژیکی و هیدرولیکی در حوضه مطالعاتی بود. داده‌های بارش ورودی برای شبیه‌سازی‌های مورد نظر از روابط محلی شدت-مدت-فراوانی شهر تهران که در طرح جامع رواناب سطحی شهر تهران توسط مهندسین مشاور مهتاب قدس در سال ۲۰۱۰ تهیه شده، استخراج شد. دوره بازگشت مطالعه، ۱۰۰ ساله و تداوم بارش طراحی شش ساعته انتخاب شد. بر اساس مطالعه مهندسین مشاور مهتاب قدس در سال ۲۰۱۱، این حوضه به نه زیرحوضه تقسیم شده که در سه زیرحوضه W1، W2 و W4، نواحی کوهستانی وجود دارد [۲۱]. متناسب با ارتفاع متوسط هر زیرحوضه، برای آن یک باران‌سنج نقطه‌ای که دارای مقدار محاسبه شده از معادلات شدت-مدت-فراوانی است، در نظر گرفته شد. با توجه به تمام این اطلاعات، مدل‌سازی‌های بارش-رواناب و روندیابی جریان با به‌کارگیری مدل SWMM انجام شد. پارامترهای مختلف جریان در گره‌ها در جدول ۲ ارائه شده و شکل ۴، وضعیت سیل‌گرفتنی شبکه را نشان می‌دهد. با توجه به عدم حضور داده‌های همزمان بارش و دبی برای حوضه مورد مطالعه، امکان کالیبراسیون نتایج حاصل از شبیه‌سازی میسر نبوده و مقادیر و نتایج، قطعی نیستند. البته این مسئله روند کار را با مشکل مواجه نمی‌کند؛ زیرا هدف این مقاله ارائه یک ساختار تحلیلی برای جانمایی حوضچه‌ها بود و نه به‌دست آوردن نتایج قطعی یا کالیبره شده.

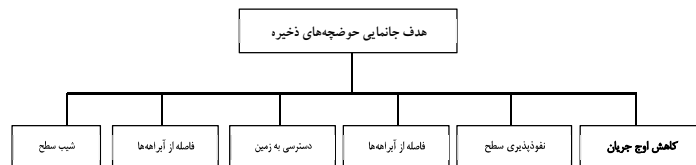
با توجه به جدول ۲ و شکل ۴، اولویت‌بندی بین گره‌ها، مطابق

مسکونی، فضای سبز و اراضی باز و بایر نشان داده شده‌اند و از نمایش سایر کاربری‌ها که درصد کمی از منطقه مورد مطالعه را پوشش می‌دهند، خودداری شده است.



شکل ۲- موقعیت مورد مطالعه نسبت به شهر تهران

در حوضه مطالعاتی، دفع آب‌های سطحی به شیوه سنتی و با بهره‌گیری از کانال‌ها انجام می‌شود. پنج بزرگراه اصلی تهران که به دلیل انتقال بخش مهمی از بار ترافیکی شهر، از ارزش اجتماعی-اقتصادی ویژه‌ای برخوردار بوده و در این منطقه واقع شده‌اند، به‌عنوان مناطق حساس در نظر گرفته شدند. تراز آب زیرزمینی در این منطقه ۱۲۰ متر بوده و با توجه به پایین بودن آن در تمامی حوضه و به دلیل عدم توانایی ایجاد تمایز بین اراضی حوضه از عوامل تصمیم‌گیری کنار گذاشته شدند. نهایتاً شش معیار کنترل سیل، نفوذپذیری سطح، دسترسی به زمین، فاصله از آبراه‌ها، شیب سطح و فاصله از بزرگراه‌ها برای جانمایی در نظر گرفته شدند. شکل ۳ ساختار سلسله مراتبی معیارها را نشان می‌دهد. همان‌طور که از این شکل پیداست، این ساختار شامل دو سطح است: (۱) سطح اول یا سطح هدف که بیانگر مکان‌یابی حوضچه‌های ذخیره در یک حوضه است؛ (۲) سطح دوم که اجزای اصلی یا همان شش معیار تصمیم‌گیری مذکور را نشان می‌دهد. هر یک از این شاخص‌ها بر حسب محدوده تغییرات خود به پنج گروه مختلف تقسیم شدند و به



شکل ۳- ساختار سلسله مراتبی برای معیارها در مورد مطالعه

جدول ۲- پارامترهای جریان در گره‌های شبکه زهکشی

گره	دبی اوج (مترمکعب در ثانیه)	دبی پر (مترمکعب در ثانیه)	نسبت دبی اوج به دبی پر (%)	زمان وقوع سیل	وقوع سیل
J6	۱۴۶	۵۹۰	۲۵	۲۰۰	ندارد
J7	۱۲۲	۱۱۰	۱۱۱	۲۰۹	دارد
J8	۱۲۴	۱۰۹	۱۱۴	۲۲۰	دارد
J9	۱۲۵	۱۲۶	۹۹	۲۲۴	ندارد
J10	۱۲۷	۲۴۸	۵۱	۲۲۸	ندارد
J11	۱۲۵	۱۷۶	۷۱	۲۴۴	ندارد
O1	۱۳۷	۱۳۰	۱۰۵	۲۶۵	ندارد

جدول ۳- امتیاز گره‌ها و زیرحوضه‌های مختلف شبکه به لحاظ معیار

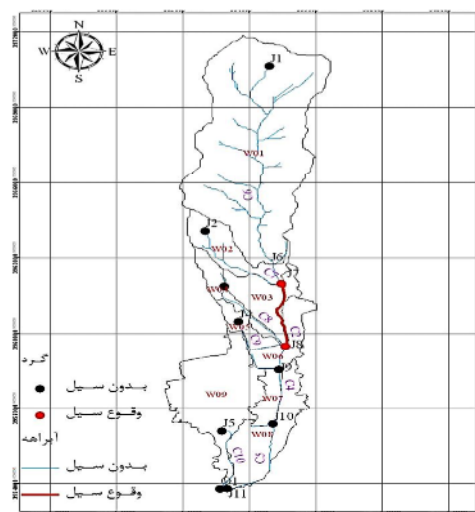
گره	کنترل سیل					
	J6	J7	J8	J9	J10	J11
امتیاز	۱	۹	۸	۵	۳	۷
حوضه	W01	W02	W03	W04	W05	W06
امتیاز	۱	۹	۸	۸	۸	۵
حوضه	W08	W09				
امتیاز	۷	۷				

برای حوضه رودخانه درکه ارائه شد. برای شش معیار تصمیم‌گیری، لایه‌های رستری تهیه و سپس مقادیر آن بر اساس نوع معیار در دامنه خود گروه‌بندی شد و به هر گروه، عددی بین ۱ (پایین‌ترین اولویت) تا ۹ (بالا‌ترین اولویت) داده شد. به این ترتیب معیارهای مختلف، یکپارچه شده و قابل مقایسه می‌باشند. در جدول ۴ حدود تغییرات سایر معیارها و شاخص اندازه‌گیری آن‌ها در حوضه درکه ارائه شده است. نظر به این که دو معیار کنترل سیل و دسترسی به زمین، فاقد شاخص کمی برای اندازه‌گیری هستند، دارای کمینه و بیشینه نبوده و از ارائه آن‌ها در این جدول خودداری شد.

گام بعدی، پیاده‌سازی AHP روی معیارهای تصمیم‌گیری بود. شایان ذکر است که از AHP در این مقاله صرفاً برای محاسبه وزن معیارها استفاده شد. AHP از معدود روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره است که دارای یک روش مشخص برای تعیین وزن معیارهای تصمیم‌گیری است. به این منظور ماتریس مقایسه‌های زوجی معیارها در نرم‌افزار اکسپرت چویس و با توجه به قضاوت‌های نویسندگان مقاله تشکیل و وزن معیارها تعیین شد. جدول ۵ ماتریس مقایسات زوجی معیارها را نشان می‌دهد. نرخ ناسازگاری قضاوت‌ها ۰/۰۴ محاسبه شد که کوچک‌تر بودن آن از حد مجاز پیشنهاد شده توسط ساعتی در سال ۱۹۸۰، یعنی مقدار ۰/۱، نشان‌دهنده سازگاری قضاوت‌های انجام شده بود [۱۰]. وزن نهایی معیارها در جدول ۶ ارائه شده است. ماتریس مقایسه‌های زوجی معیارها معمولاً بر مبنای قضاوت متخصصان و کارشناسان و با انجام مصاحبه و تهیه پرسشنامه تعیین می‌شود. اما با توجه به هدف این تحقیق مبنی بر ارائه روش، در این جا از نظر افراد متخصص استفاده نشد.

مرحله نهایی، ترکیب AHP و GIS برای دستیابی به نقشه تناسب قرارگیری حوضه‌های ذخیره بود. به این منظور، برهم نهی وزنی لایه‌های رستری معیارها با استفاده از تابع Raster Calculator در نرم‌افزار ArcGIS انجام گرفت. معادله‌ای که طی آن معیارهای تصمیم‌گیری ترکیب شدند، مطابق رابطه ۱ است

$$V_i = \sum_{j=1}^n W_j V_{ij} \quad (1)$$



شکل ۴- وضعیت سیل‌گرفتگی شبکه در دوره بازگشت ۱۰۰ ساله

الگوریتمی که بیشتر به آن اشاره شد، انجام گرفت. ابتدا دو گره دارای سیل، J7 و J8 به عنوان گره‌های دارای ارجحیت انتخاب شدند و با توجه به این که J7 نسبت به J8 در بالادست شبکه قرار داشت، امتیاز بالاتری را کسب کرد. در بین گره‌های فاقد سیل‌گرفتگی، گره O1 با توجه به نسبت بالاتر دبی پیک به پر در رتبه اول قرار گرفت. در گام بعدی، امتیاز این گره‌ها به حوضه آن‌ها نسبت داده شد. حوضه گره J7 (دارای بالاترین امتیاز)، زیرحوضه‌های W1 و W2 می‌باشند که با توجه به مشترک بودن زیرحوضه W1 بین دو گره J6 و J7، این زیرحوضه امتیاز ۱ (امتیاز گره J6) و زیرحوضه W2 امتیاز ۹ را کسب نمود. این روند برای سایر گره‌ها نیز انجام شد و امتیاز نهایی زیرحوضه‌ها و گره‌ها به لحاظ معیار کنترل سیل در جدول ۳ نشان داده شد.

۴-۲- تشکیل ساختار تصمیم‌گیری برای مورد مطالعه

در این قسمت تشکیل ساختار تصمیم‌گیری مکانی معرفی شده

جدول ۴- حدود تغییرات در معیارهای تصمیم‌گیری در محدوده مطالعاتی

معیار	شاخص	کمینه	بیشینه
نفوذپذیری سطح	CN	۶۶	۸۶
فاصله از بزرگراه	متر	۰	۱۲۵۰۰
فاصله از بزرگراه	متر	۰	۲۰۰۰
شیب سطح	درجه	۰/۲	۴۶

جدول ۵- ماتریس مقایسات زوجی برای معیارهای تصمیم‌گیری

معیار	شیب سطوح	فاصله از آبراهه‌ها	فاصله از بزرگراه‌ها	نفوذپذیری سطح	کاهش پیک	دسترسی زمین
شیب سطح	۱	۰/۲۰۰	۰/۳۳۳	۰/۱۴۳	۰/۱۱۱	۰/۱۲۵
فاصله از آبراهه‌ها	۵	۱	۳	۰/۳۳۳	۰/۲۰۰	۰/۲۵۰
فاصله از بزرگراه‌ها	۳	۰/۳۳۳	۱	۰/۲۰۰	۰/۱۴۳	۰/۱۶۷
نفوذپذیری سطح	۷	۳	۵	۱	۰/۳۳۳	۰/۵۰۰
کاهش پیک	۹	۵	۷	۳	۱	۲
دسترسی زمین	۸	۴	۶	۲	۰/۵۰۰	۱

که در این رابطه

V_i امتیاز نهایی پیکسل i ، n تعداد کل معیارها (که در این جا برابر ۶ است)، W_j وزن معیار j (مقادیر جدول ۶) و v_{ij} امتیاز پیکسل i بر حسب معیار j است.

به این ترتیب نقشه تناسب احداث حوضچه در منطقه مطالعاتی تولید می‌شود. امتیاز نهایی هر سلول در نقشه نهایی که عددی بین ۱ تا ۹ است، بیانگر میزان تناسب آن برای احداث حوضچه است. به منظور بیان واضح تر نقشه مذکور برای خوانندگان، امتیازهای محاسبه شده به چهار گروه طبقه‌بندی و به هر کدام یک شاخص کیفی نیز نسبت داده شد که در جدول ۷ آمده است. بدیهی است که اراضی گروه ۴ (مناسب‌ترین: امتیاز بین ۷ تا ۹) برای احداث حوضچه پیشنهاد می‌شوند. نقشه نهایی مناطق مناسب برای احداث حوضچه‌ها بر اساس گروه‌بندی‌های کیفی صورت گرفته در شکل ۵ نمایش داده شده است. این نقشه میزان ظرفیت هر سلول از حوضه مورد مطالعه را برای احداث حوضچه‌های ذخیره نشان می‌دهد. نظر به انعطاف پذیر بودن ساختار تصمیم‌گیری ارائه شده، می‌توان آن را برای جانمایی دیگر BMPها، در پروژه‌هایی با اهداف متفاوت و در سایر حوضه‌های شهری مورد استفاده قرار داد. بر اساس شکل مذکور، اراضی گروه‌های ۱ تا ۴ به ترتیب ۲، ۱۳، ۷۷ و ۸ درصد حوضه را پوشش می‌دهند. بنابراین ۷۹ درصد اراضی حوضه برای احداث حوضچه نامناسب هستند. اراضی گروه ۴ که مناسب‌ترین مناطق برای احداث حوضچه هستند، عمدتاً در بالادست حوضه قرار

دارند. علت این نتیجه را می‌توان ناشی از دو دلیل عمده زیر دانست: (۱) همان طور که در نتایج مدل‌سازی هیدرولیکی توضیح داده شد، حوضه عمدتاً در بالادست با مشکل سیل‌گرفتگی مواجه است و با توجه به وزن بالای معیار کنترل سیل، نواحی بالادست حوضه، امتیاز زیادی از این عامل را کسب می‌کنند؛ و (۲) در این قسمت، فضاهای بازی موجودند که بالاترین امتیاز را در میان کاربری‌های اراضی مختلف در اختیار دارند. با توجه به این که این معیار دومین عامل مهم تصمیم‌گیری است، این سطوح، امتیاز زیادی را از این عامل به دست می‌آورند. شایان ذکر است که نواحی موجود در گروه ۴ که در بخش‌های پایین دست حوضه قرار دارند نیز عمدتاً در فضاهای سبز و اراضی باز قرار گرفته‌اند. این مسئله نیز به دلیل مهم بودن معیار دسترسی به زمین و بالا بودن امتیاز کاربری فضاهای سبز است.

جدول ۶- مقدار وزن نهایی معیارهای تصمیم‌گیری

معیار	شیب سطوح	فاصله از آبراهه‌ها	فاصله از بزرگراه‌ها	نفوذپذیری سطح	وزن
	۰/۰۲۶	۰/۰۹	۰/۰۴۶	۰/۱۷۹	

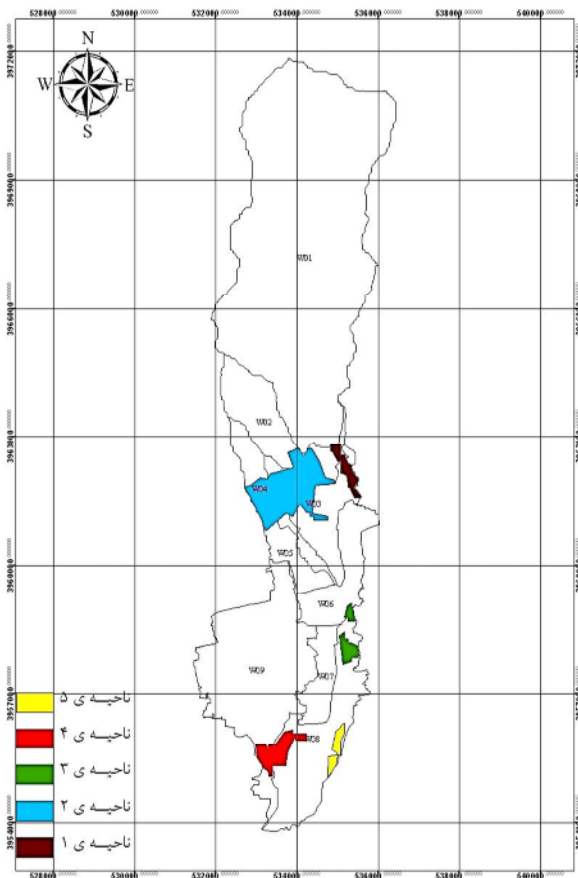
به منظور انتخاب مکان نهایی قرارگیری حوضچه، باید نواحی موجود در گروه ۴ مورد ارزیابی قرار گیرند. در این راستا، نواحی که دارای مساحت کمتر از ۴ هکتار بودند، حذف و سایر نواحی باقیمانده به عنوان مناطق منتخب اولیه در نظر گرفته شدند [۲۲]. در

جدول ۷- طبقه‌بندی اراضی محدوده مطالعاتی

برای احداث حوضچه ذخیره

گروه	۱	۲	۳	۴
محدوده امتیاز	۳-۱	۵-۳	۷-۵	۹-۷
توصیف کیفی	نامناسب ترین	نامناسب	مناسب	مناسب ترین

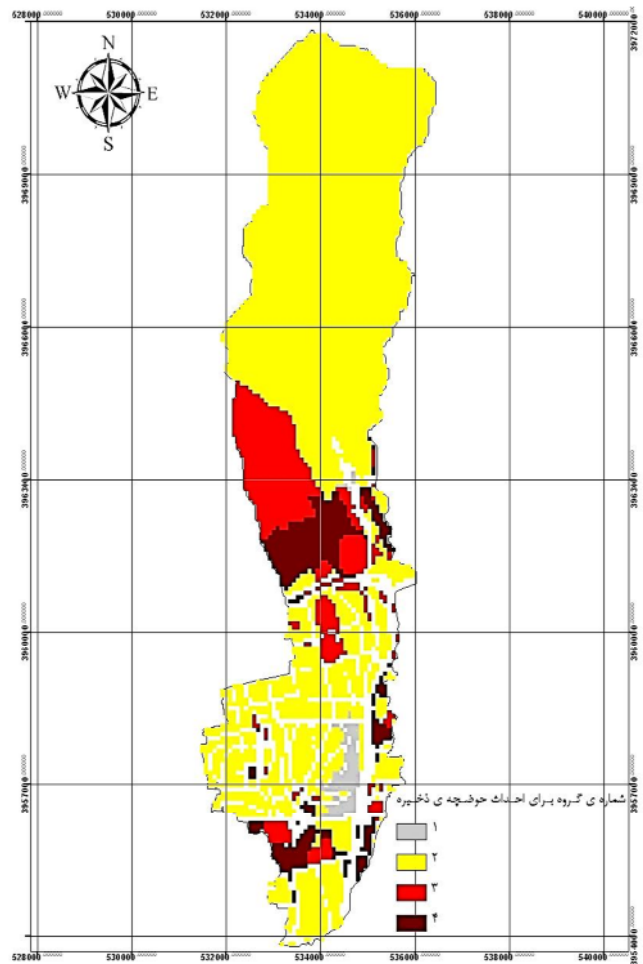
باید توجه داشت که ساختار تصمیم‌گیری ارائه شده نباید به تنهایی به‌عنوان ابزار تصمیم‌گیری استفاده شود و ارزیابی‌های تکمیلی برای اتخاذ تصمیم نهایی مورد نیاز است. برای مثال، تحلیل حساسیت نتایج به‌دست آمده با تغییر اهمیت معیارهای تصمیم‌گیری برای یافتن نتایج دقیق‌تر پیشنهاد می‌شود.



شکل ۶- نواحی اولیه انتخاب شده برای احداث حوضچه‌ها

لازم به توضیح است که با توجه به نقش برجسته وزن معیارها در تصمیم‌گیری چندمعیاره، معمولاً پیشنهاد می‌شود که این مرحله بر مبنای قضاوت‌های متخصصان انجام شود [۲۳]. با این حال، این گام در مطالعه فعلی با قضاوت نویسندگان مقاله انجام گرفت؛ زیرا در این تحقیق از تصمیم‌گیری چندمعیاره صرفاً به‌عنوان یک ابزار

این جا پنج ناحیه که در شکل ۶ نمایش داده شده‌اند، به‌عنوان نواحی منتخب اولیه انتخاب شدند. در گام بعدی، امتیاز متوسط این نواحی با استفاده از نرم‌افزار ArcGIS محاسبه شد. محاسبات انجام شده حاکی از نزدیکی امتیاز متوسط این نواحی (۷/۹، ۷/۶، ۷/۷، ۷/۶، ۷/۳ و ۷/۳ به ترتیب برای نواحی ۱ تا ۵ در شکل ۶) بود. معمولاً در چنین شرایطی، می‌توان این مناطق را بر اساس یک معیار جدید که جزء عوامل تصمیم‌گیری اولیه نبوده و نیز پتانسیل تفکیکی گزینه‌ها را دارا باشد، اولویت‌بندی کرد. یکی از مشکلات موجود در مطالعه فعلی که می‌تواند باعث تغییر در امتیاز نهایی سلول‌های نقشه تناسب اراضی شود، عدم انجام صحت‌سنجی نتایج مدل‌سازی بارش-رواناب است. بنابراین در مطالعه فعلی، انتخاب نواحی از روی امتیاز پیکسل‌های درونی، علی‌رغم نزدیک بودن امتیازهای آن‌ها منطقی به نظر می‌رسد. با توجه به توضیحات مذکور، ناحیه ۲ به‌عنوان مکان نهایی پیشنهاد شد.



شکل ۵- نقشه تناسب اراضی حوضه درکه برای احداث حوضچه‌های ذخیره بر اساس طبقه‌بندی‌های ذکر شده

یا چند BMP مد نظر باشد، ساختار ارائه شده نیاز به تکمیل و بهبود خواهد داشت.

۵- نتیجه‌گیری

در این مطالعه، روشی برای جانمایی حوضچه‌های ذخیره به‌منظور استفاده بهینه از این تأسیسات با بهره‌گیری از یک مدل هیدرولوژیکی - هیدرولیکی، GIS و روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره معرفی شد. روش مذکور از نتایج مدل‌سازی هیدرولوژیکی - هیدرولیکی برای جانمایی حوضچه‌ها به‌منظور کنترل سیلاب به‌صورت مستقیم استفاده می‌کند. مدل SWMM برای مدل‌سازی هیدرولوژیکی و هیدرولیکی، و ترکیب GIS و AHP به‌عنوان ساختار تصمیم‌گیری چندمعیاره مکانی مورد استفاده قرار گرفت. به‌منظور نشان دادن کاربرد روش ارائه شده، این الگوریتم روی یک زیرحوضه شهری واقع در شهر تهران پیاده شد. خروجی ساختار ارائه شده، نقشه‌ای است که میزان تناسب هر نقطه از حوضه مورد مطالعه را برای احداث حوضچه‌های ذخیره نشان می‌دهد. با توجه به این که نتایج شبیه‌سازی‌های هیدرولوژیکی - هیدرولیکی به‌طور مستقیم وارد ساختار جانمایی حوضچه‌ها می‌شوند، الگوریتم ارائه شده، روند جانمایی حوضچه‌های ذخیره را در سطح یک شهر بهبود می‌بخشد. نظر به انعطاف‌پذیری ساختار معرفی شده، می‌توان آن را برای جانمایی دیگر BMPها، در پروژه‌هایی با اهداف متفاوت و در سایر حوضه‌های شهری مورد استفاده قرار داد.

برای ارائه روند جدید معرفی شده برای جانمایی BMPها بهره گرفته شد و محاسبه نتایج دقیق، خارج از اهداف این مقاله بود. بنابراین نتایج ارائه شده نیز نباید به‌عنوان نتایج نهایی و قطعی در نظر گرفته شوند. تحلیل عدم قطعیت‌های ناشی از عدم استفاده از نظرات کارشناسان برای مطالعات آینده پیشنهاد می‌شود. یکی دیگر از محدودیت‌های کاربرد الگوریتم ارائه شده برای استفاده از نتایج شبیه‌سازی هیدرولیکی در ساختار تصمیم‌گیری چندمعیاره این است که روش مذکور برای حوضه‌ای با یک آبراهه اصلی ارائه شده است. در صورت وجود چند آبراهه اصلی در یک حوضه، مسئله پیچیده‌تر شده و الگوریتم مذکور نیاز به تکمیل دارد. برای توسعه چنین الگوریتمی توجه به عوامل دیگر مانند زمان شروع سیل، مدت سیل‌گرفتگی، دبی اوج و پر و زمان رسیدن به اوج جریان در گره‌های شبکه آبراهه‌ها نیز نیاز است. البته باید توجه داشت که با توجه به عدم توانایی مدل SWMM در شبیه‌سازی سیل، امکان در نظر گرفتن برخی از ویژگی‌های سیل، مانند تراز (عمق آبگرفتگی) در الگوریتم ارائه شده وجود ندارد. بنابراین می‌توان برای تکمیل الگوریتم مزبور در آینده، از مدل‌هایی با قابلیت شبیه‌سازی پخش سیل نیز استفاده نمود.

روش ارائه شده صرفاً برای یک BMP که در این جا حوضچه ذخیره بود، ارائه شد و می‌توان آن را با ایجاد تغییر در معیارهای تصمیم‌گیری و نیز بر مبنای اهداف تحقیق برای سایر BMPها نیز به‌کار برد اما باید توجه داشت که در صورتی که جانمایی ترکیبی دو

۶- مراجع

1. Iran Water Resources Management Company. (2006). *Draft flood damage estimation manual*, 296-a, Iran Energy Department, Tehran. (In Persian)
2. Tingsanchali, T. (2012). "Urban flood disaster management." *Proc. Eng.*, 32, 25-37.
3. Chen J., Hill, A. A., and Urbano, L. D. (2009). "A GIS-based model for urban flood inundation." *J. of Hydrol.*, 373 (1-2), 184-192.
4. Young, K. D., Kibler, D. F., Benham, B. L., and Loganathan, G. V. (2009). "Application of the analytical hierarchical process for improved selection of storm-water BMPs." *J. Water Res. Plan. Manag.*, 135 (4), 264-275.
5. Yeh, C.H., and Labadie, J. W. (1997). "Multiobjective watershed-level planning of storm water detention systems." *J. Water Res. Plan. Manag.*, 123 (6), 336-343.
6. Emerson, C. H., Welty, C., and Traver, R. G. (2005). "Watershed-scale evaluation of a system of storm water detention basins." *J. of Hydrol. Eng.*, 10 (3), 237-242
7. Gilroy, K. L., and McCuen, R. H. (2009). "Spatio-temporal effects of low impact development practices." *J. Hydrol.*, 367(3-4), 228-236.
8. Schneider, L. E., and McCuen, R. H. (2006). "Assessing the hydrologic performance of best management practices." *J. Hydrol. Eng.*, 11 (3), 278-281.

9. Fang, Z., Zimmer, A., Bedient, P. B., Robinson, H., Christian, J., and Vieux, B. E. (2010). "Using a distributed hydrologic model to evaluate the location of urban development and flood control storage." *J. Water Res. Plan. Manag.*, 136 (5), 597-601.
10. Saaty, T. L. (1980). *The analytical hierarchical process: Planning, priority settings, resource allocation*, McGraw-Hill Pub., New York, NY.
11. Palmeri, L., and Trepel, M. (2002). "A GIS-based score system for siting and sizing of created or restored wetlands: two case studies." *Water Res. Manag.*, 16, 307-328.
12. Keir, A.W., Doucett, J. A., and Oliveri, T. (1993). "Landfill siting using GIS technology: The case of the peel landfill site search." *Canadian Conference on GIS*, Ottawa, Canada.
13. Tkach, R. J., and Simonovic, S. P. (1997). "A new approach to multi-criteria decision making in water resources." *J. Geog. Inf. Decis. Anal.*, 1 (1), 25-44.
14. Meyer, V., Scheuer, S., and Haase, D. (2009). "A multicriteria approach for flood risk mapping exemplified at the Mulde River, Germany." *Nat. Hazards*, 48 (1), 17-39.
15. Shahmansouri, A., Sabahi, M. S., Rezaei Adryani, R., Lotfi, A., and Khodadi Darban, A. (2012). "The application of Analytical Hierarchy Process (AHP) in the selection of type and location of water treatment plant." *J. of Water and Wastewater* 84, 134-139. (In Persian)
16. Prince George's County Department of Environmental Resources. (2005). *BMP/LID decision support system for watershed based stormwater management: User's guide*, Department of Environmental Resources Programs and Planning Division, Largo, MD.
17. United States Environmental Protection Agency. (2012). *System for urban stormwater treatment and analysis integration (SUSTAIN) model*, Office of Research and Development, Cincinnati, OH.
18. Young, K. D., Dymond, R. L., and Kibler, D. F. (2011). "Development of an improved approach for selecting stormwater best management practices." *J. Water Res. Plan. Manag.*, 137 (3), 268-275.
19. Cronshey, R. (1986). *Urban hydrology for small watersheds*, 2nd Ed., Natural Resources Conservation Service, Washington, DC.
20. United States Department of Agriculture- National Resources Conservation Service. (2004). *Chapter 10: Estimation of direct runoff from storm rainfall*, Part 630: Hydrology: National Engineering Handbook, Washington, DC.
21. Mahab Ghodss Consulting Engineers. (2011). *Tehran stormwater master project*, Tehran. (In Persian)
22. United States Environmental Protection Agency. (2000). *National menu of stormwater best management practices: Dry detention ponds*, USA.
<http://cfpub.epa.gov/npdes/stormwater/menuofbmps/index.cfm?action=factsheet_results&view=specific&mp=67> (May 1, 2012)
23. Munda, G. (2006). "Social multi-criteria evaluation for urban sustainability policies." *Land Use Policy*, 23 (1), 86-94.