Archive of SID

تحقیقات منابع آب ایران
Iran-Water Resources Research

سال یازدهم، شماره ۲، پائیز ۱۳۹۴
Volume 11, No. 2, Fall 2015 (IR-WRR)
۱۱۷-۱۳۴

تخصیص بار آلودگی در رودخانه‌ها: مرور پیشینه مطالعات و چشم‌انداز مطالعات آتی

نجمه مهجوری مجد[۱*]

چکیده

تخصیص بار آلودگی به منظور تعیین سطح بهینه تصفیه یا نحوه مدیریت هر یک از منابع آلودگی رودخانه، به عنوان یک روش رایج در مدیریت کیفیت آب رودخانه‌ها، همواره مورد توجه پژوهشگران و مدیران قرار داشته است. در مدل‌های پیشنهاد شده برای تخصیص بار آلودگی معمولاً اهداف و محدودیت‌های مختلفی مانند حداقل‌سازی هزینه‌های تصفیه، رعایت عدالت در توزیع هزینه‌ها، کاهش شدت تخطی کیفیت آب از استانداردها و کاهش طول دوره‌های تخطی مورد توجه قرار می‌گیرند. بررسی پیشینه مطالعات نشان می‌دهد، علی‌رغم اهمیت و گستردگی مطالعات انجام شده، تاکنون یک مقاله مروری جامع در این زمینه منتشر نشده است. تنها مورد مرتبط، مقاله‌ای است که توسط de Melo and Câmara (1994) در زمینه بهینه‌سازی منطقه‌ای سیستم‌های تصفیه فاضلاب نوشته شده است و در آن اهداف و محدودیت‌های مدل‌های مدیریت کیفیت آب رودخانه بررسی شده‌اند. در سال‌های اخیر، لحاظ کردن عدم‌قطعیت‌های مهم و مدل‌سازی مطلوبیت‌ها و روابط بین تخلیه‌کنندگان به طور ویژه مورد توجه قرار گرفته است. در این مقاله، بیش از ۶۰ مقاله از مهم‌ترین مقالات چاپ شده در زمینه تخصیص بار آلودگی در رودخانه‌ها مورد بررسی قرار می‌گیرد و در مورد دلایل استفاده، مزایا و محدودیت‌های روش‌های گوناگون تخصیص بار آلودگی به کار رفته در این مقالات بحث می‌شود. با توجه به محدودیت حجم مقاله و ماهیت مروری آن، فرمولاسیون و روابط توسعه داده شده در زمینه تخصیص بار آلودگی بررسی نشده‌اند. همچنین، چشم‌اندازهای موجود برای بهبود رویکردهای فعلی در مطالعات آتی می‌شوند.

کلمات کلیدی: تخصیص بار آلودگی، رودخانه، کیفیت آب، بهینه‌سازی، شبیه‌سازی، عدم قطعیت‌ها.

تاریخ دریافت مقاله: ۹۳/۳/۲۶
تاریخ پذیرش مقاله: ۹۴/۳/۱۲

۱- استادیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی.
*- نویسنده مسئول

Waste Load Allocation in Rivers: A State of the Art Review and Prospects for Future Studies

N. Mahjouri [1]*

Abstract

Waste load allocation (WLA), which refers to determination of the optimum treatment level of waste load discharged into a river by every pollution source, has attracted the researchers and policy makers during the last decades. In most proposed WLA models, objectives and constraints such as minimizing the treatment costs, equity considerations in distributing costs, minimizing the amount of river water quality violations, and minimizing the duration of violation intervals are taken into account. In spite of the importance of the researches on WLA in rivers, there is only one paper by de Melo and Câmara (1994) in the literature which present an integrated review on the main objectives and constraints in river water quality management models. Recently, modeling important uncertainties and dischargers' utilities have become the major focus of many WLA researches. In this paper, more than 60 major papers in the field of WLA in rivers are reviewed and their main aspects, virtues, and limitations are discussed. Also, some prospects and ideas for improving the current models in future are presented.

Keywords: Waste load allocation; River, Water quality, Optimization, Simulation, Uncertainties.

Received: June 16, 2014
Accepted: June 2, 2015

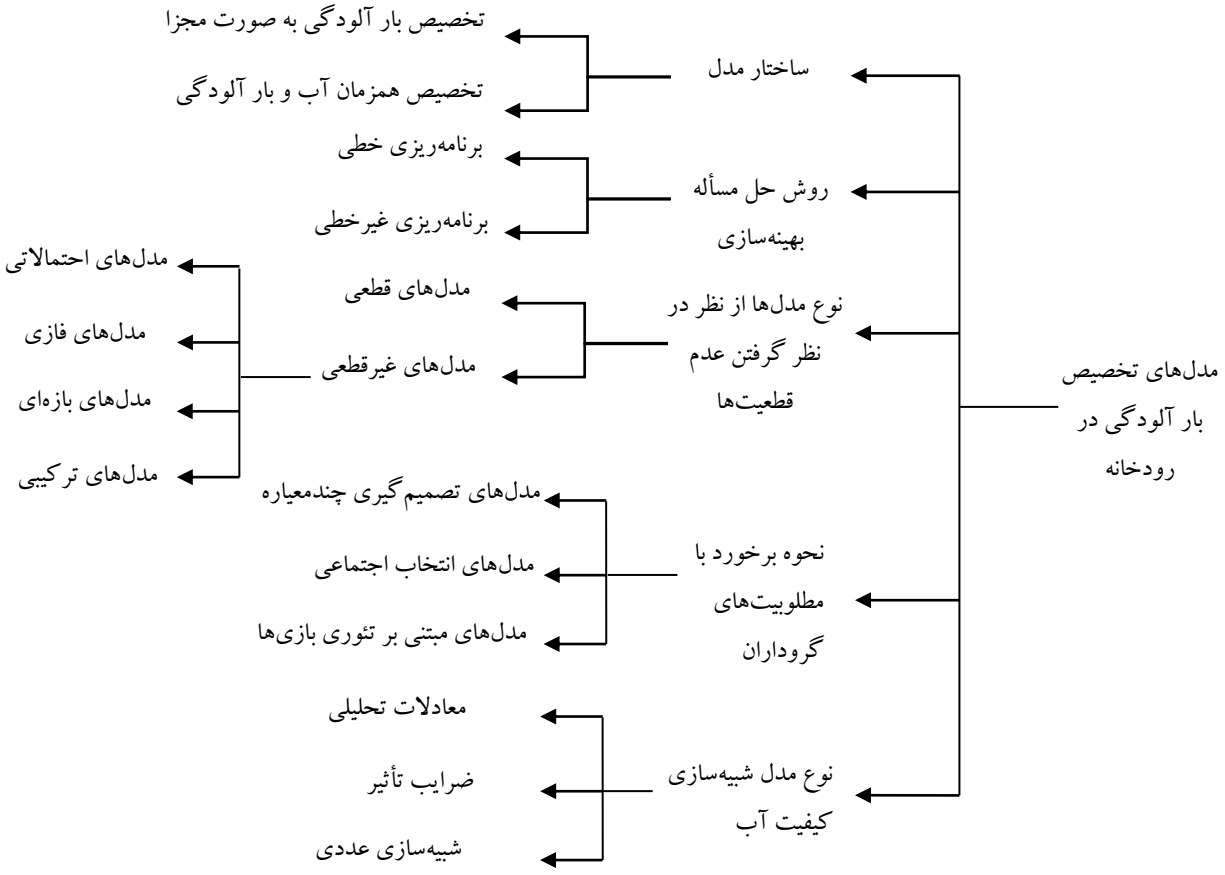
1- Assistant Professor, Faculty of Civil Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Iran, Email: mahjouri@kntu.ac.ir
*- Corresponding Author

www.SID.ir

Archive of SID

۱- مقدمه

تاکنون، تحقیقات زیادی در مورد تعیین ظرفیت پذیرش بار آلودگی منابع آب و تخصیص و تجارت مجوزهای تخلیه بار آلودگی انجام شده است. در دهه‌های گذشته، تخصیص مناسب یا بهینه بار آلودگی در رودخانه‌ها با توجه به نقش گرودارن[1] با اهداف و مطلوبیت‌های متفاوت، به عنوان یکی از مسائل مهم در بحث مدیریت کیفیت آب‌های سطحی، از دیدگاه‌های اقتصادی، زیست‌محیطی، عدالت اجتماعی و غیره، مورد توجه ویژه پژوهشگران قرار داشته است. در این مقاله، ضمن بررسی تحقیقات انجام شده در زمینه تخصیص بار آلودگی در رودخانه‌ها، به دسته‌بندی و مقایسه روش‌های توسعه داده شده به این منظور پرداخته می‌شود و نقاط قوت و ضعف این روش‌ها مورد بحث قرار می‌گیرند. همچنین، به زمینه‌های تحقیقاتی آینده در زمینه مدیریت کیفیت آب و تخصیص بار آلودگی در رودخانه‌ها پرداخته می‌شود. در بخش‌های بعد، به بررسی مهم‌ترین مطالعات و تحقیقات انجام شده در زمینه تخصیص بهینه بار آلودگی در قالب ساختاری که در شکل ۱ ارائه شده، پرداخته می‌شود. مقالات موجود با در نظر گرفتن مواردی چون ساختار مدل‌های به کار رفته، روش حل مسأله بهینه‌سازی، چگونگی در نظر گرفتن عدم قطعیت‌ها، نحوه برخورد با مطلوبیت‌های گرودارن و نوع مدل شبیه‌سازی کیفیت آب رودخانه که در تحقیقات به کار رفته است، دسته‌بندی و بررسی شده‌اند. همچنین، در جدول ۱، مهم‌ترین ویژگی‌های مطالعاتی که در مقاله حاضر ارزیابی شده‌اند، به صورت خلاصه ارائه شده است. لازم به ذکر است در مقاله حاضر، تنها به تحقیقات در زمینه تخصیص بار آلودگی در رودخانه‌ها پرداخته شده است و مقالات موجود در زمینه تجارت مجوزهای تخلیه بار آلودگی بررسی نشده‌اند.



شکل ۱- دسته‌بندی مدل‌های تخصیص بار آلودگی از جنبه‌های گوناگون

www.SID.ir

Archive of SID

جدول ۱- مروری بر مهم‌ترین مقالات در زمینه تخصیص بار آلودگی در رودخانه‌ها

محقق	نوع مدل از جنبه در نظر گرفتن عدم قطعیت‌ها				الگوریتم حل مدل بهینه‌سازی	نحوه برخورد با مطلوبیت‌های گرودارن			نحوه در نظر گرفتن تغییرات کیفیت آب رودخانه در مدل بهینه‌سازی
	قطعی	غیر قطعی				بهینه‌سازی تک‌هدفه/چندهدفه	انتخاب اجتماعی	تئوری بازی‌ها	
		روش در نظر گرفتن عدم قطعیت							
		بازه‌ای	فازی	احتمالاتی					
Liebman and Lynn (1966)	✓				برنامه‌ریزی پویا	تک‌هدفه			معادلات استریتر و فلپس[1]
Loucks et al. (1967)	✓				برنامه‌ریزی خطی	تک‌هدفه			معادلات استریتر و فلپس
ReVelle et al. (1968)	✓				برنامه‌ریزی خطی	تک‌هدفه			معادلات استریتر و فلپس
Arbabi and Elzinga (1975)	✓				برنامه‌ریزی خطی	تک‌هدفه			معادلات استریتر و فلپس
Lohani and Hee (1983)				✓	برنامه‌ریزی پویا با محدودیت شانسی[2]	تک‌هدفه			مدل شبیه‌سازی Camp (Camp (1963))
Herbay et al. (1983)	✓				برنامه‌ریزی خطی	تک‌هدفه			معادلات استریتر و فلپس
Burn and Mc Bean (1985)				✓	برنامه‌ریزی پویا با محدودیت شانسی	چند هدفه			معادلات استریتر و فلپس
Burn and Mc Bean (1986)				✓	برنامه‌ریزی پویا با محدودیت شانسی	چند هدفه			معادلات استریتر و فلپس
Fujiwara et al. (1986)				✓	برنامه‌ریزی پویا با محدودیت شانسی	تک‌هدفه			معادلات استریتر و فلپس
Rossman (1989)				✓	برنامه‌ریزی خطی و غیر خطی	تک‌هدفه			معادلات استریتر و فلپس
Hathhorn & Tung (1989)	✓		✓		برنامه‌ریزی خطی فازی	چند هدفه			معادلات استریتر و فلپس
Tung & Hathhorn (1989)	✓				برنامه‌ریزی خطی	چند هدفه			معادلات استریتر و فلپس
Lence et al. (1990)				✓	جستجوی مستقیم + برنامه‌ریزی خطی	تک هدفه			ضرایب تأثیر
Lence and Takyi (1992)				✓	برنامه‌ریزی خطی و غیر خطی	تک هدفه			ضرایب تأثیر
Warwich and Roberts (1992)				✓	از مدل بهینه‌سازی استفاده نشده است.	-			استفاده از مدل شبیه‌سازی QUAL-TX
Cardwell and Ellis (1993)				✓	برنامه‌ریزی پویای استوکستیک	چند هدفه			QUAL2E و WASP4
Takyi and Lence (1995)				✓	بهینه سازی غیر خطی مبتنی بر جستجوی مستقیم	چند هدفه			ضرایب تأثیر
Chang et al. (1997)		✓	✓		برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح	چند هدفه			ضرایب تأثیر
Sasikumar and Mujumdar (1998)			✓	✓	برنامه‌ریزی خطی فازی	چند هدفه			معادلات استریتر و فلپس
Takyi and Lence (1999)				✓	برنامه‌ریزی خطی دو مرحله‌ای	تک هدفه			معادلات استریتر و فلپس اصلاح شده
Sasikumar and			✓	✓	برنامه‌ریزی خطی فازی	چند هدفه			معادلات استریتر و

1-Streeter and Phelps (1925)
2-Chance Constrained Dynamic Programming

www.SID.ir

Archive of SID

محقق	نوع مدل از جنبه در نظر گرفتن عدم قطعیت‌ها				الگوریتم حل مدل بهینه‌سازی	نحوه برخورد با مطلوبیت‌های گرودارن			نحوه در نظر گرفتن تغییرات کیفیت آب رودخانه در مدل بهینه‌سازی
	قطعی	غیر قطعی				بهینه‌سازی تک‌هدفه/چندهدفه	انتخاب اجتماعی	تئوری بازی‌ها	
		روش در نظر گرفتن عدم قطعیت							
		بازه‌ای	فازی	احتمالاتی					
Mujumdar (2000)									فلپس
Vasquez et al. (2000)				✓	الگوریتم ژنتیک	چند هدفه			معادلات استریتر و فلپس
Burn & Yulianti (2001)	✓				الگوریتم ژنتیک	چند هدفه			QUAL2E
Mujumdar and Sasikumar (2002)			✓	✓	برنامه‌ریزی خطی فازی	چند هدفه			معادلات استریتر و فلپس
Mujumdar and Vemula (2004)			✓		الگوریتم ژنتیک	چند هدفه			QUAL2E
Vemula et al. (2004)			✓	✓	الگوریتم ژنتیک	چند هدفه			QUAL2E
Cho et al. (2004)	✓				الگوریتم ژنتیک	تک هدفه			QUAL2E
Kerachian and Karamouz (2005)	✓				الگوریتم ژنتیک با طول کروموزم متغیر	چند هدفه			بیلان جرم نمک
Ghosh & Mujumdar (2006)				✓	جستجوی مستقیم	چند هدفه			یک مدل شبیه‌سازی یک بعدی BOD-DO
Karamouz et al. (2006)	✓					-		✓	حل عددی معادلات پخش و انتقال آلودگی
Karmaker and Mujumdar (2006)		✓	✓		برنامه‌ریزی خطی	چند هدفه			معادلات استریتر و فلپس
Yandamuri et al. (2006)	✓				NSGAII	چند هدفه			یک مدل شبیه‌سازی یک بعدی BOD-DO
Singh et al. (2007)			✓		برنامه‌ریزی خطی	چند هدفه			معادلات استریتر و فلپس
Karmakar and Mujumdar (2007)		✓	✓		جستجوی مستقیم	چند هدفه			معادلات استریتر و فلپس
Saadatpour and Afshar (2007)			✓		الگوریتم ژنتیک	چند هدفه			QUAL2E
Qin and Huang (2009)		✓			برنامه‌ریزی توانی	تک هدفه			مدل O'Connor and Dobbins (1958)
Qin et al. (2009)		✓			برنامه‌ریزی توانی	تک هدفه			مدل O'Connor and Dobbins (1958)
Rehana and Mujumdar (2009)		✓	✓	✓	جستجوی مستقیم	چند هدفه			مدل عددی با استفاده از یک روش تفاضل محدود پسرو
Zhu et al. (2009)		✓	✓		برنامه‌ریزی خطی معادل یک مدل غیرخطی	تک هدفه			معادلات استریتر و فلپس
Ghosh and Mujumdar (2010)			✓	✓	جستجوی مستقیم	چند هدفه			مدل عددی با استفاده از یک روش تفاضل محدود پسرو
Zou et al. (2010)	✓				برنامه‌ریزی خطی بازه‌ای	تک هدفه			WASP

www.SID.ir

Archive of SID

محقق	نوع مدل از جنبه در نظر گرفتن عدم قطعیت‌ها				الگوریتم حل مدل بهینه‌سازی	نحوه برخورد با مطلوبیت‌های گرودارن			نحوه در نظر گرفتن تغییرات کیفیت آب رودخانه در مدل بهینه‌سازی
	قطعی	غیر قطعی				بهینه‌سازی تک‌هدفه/چندهدفه	انتخاب اجتماعی	تئوری بازی‌ها	
		روش در نظر گرفتن عدم قطعیت							
		بازه‌ای	فازی	احتمالاتی					
Yang et al. (2011)	✓				برنامه‌ریزی خطی	چند هدفه			شبیه‌سازی تحلیلی- عددی
Mostafavi & Afshar (2011)	✓				Non-dominated Archiving Multi-colony Ant Algorithm (NA-ACO)	چند هدفه			QUAL2K
Xie et al. (2011)		✓			برنامه‌ریزی خطی بازه‌ای	تک هدفه			بیلان جرم آلاینده
Han et al. (2012)				✓	برنامه‌ریزی خطی با محدودیت شانسی	تک هدفه			QUAL2E-UNCAS
Nikoo et al. (2012a)		✓			بهینه‌سازی بازه‌ای غیرخطی	تک‌هدفه		✓	بیلان جرم نمک
Nikoo et al. (2012b)			✓	✓	NSGAII	چند هدفه		✓	معادلات استریتر و فلپس
Abed-Elmdoust and Kerachian (2012)				✓	جستجوی مستقیم	-		✓	ضرایب تأثیر به دست آمده از مدل QUAL2Kw
Nikoo et al. (2013)			✓		الگوریتم ژنتیک	تک هدفه		✓	بیلان جرم نمک
Mahjouri & Bizhani-Manzar (2013)	✓				-	چند هدفه	✓		ضرایب تأثیر به دست آمده از مدل QUAL2Kw
Tavakoli et al. (2014)		✓			برنامه‌ریزی خطی تکرار شونده	تک هدفه			بیلان جرم نمک و SWAP (Soil, Water, Atmosphere, and Plant)
Nikoo et al. (2014)		✓		✓	SDP و PSO-SA	تک هدفه			بیلان جرم نمک
Cho and Lee (2014)	✓				الگوریتم ژنتیک	چند هدفه			QUAL2Kw
Liu et al. (2014)	✓				NSGAII	چند هدفه			حل معادله دیفرانسیل پخش و انتقال آلاینده
Mahjouri & Abbasi (2014)		✓	✓	✓	الگوریتم ژنتیک	چند هدفه	✓		استفاده از ضرایب انتقال به دست آمده از مدل شبیه‌سازی Qual2kw
Malakpour-Estelaki et al. (2015)	✓				الگوریتم ژنتیک	تک هدفه		✓	ضرایب تأثیر به دست آمده از مدل QUAL2Kw
Tavakoli et al. (2015)			✓	✓	برنامه‌ریزی خطی تکرار شونده	تک هدفه	✓		QUAL2Kw, SWAP (Soil, Water, Atmosphere, and Plant)

www.SID.ir

Archive of SID

ساختار مدل تخصیص بار آلودگی از لحاظ در نظر گرفتن عدم قطعیت‌ها

○ مدل‌های قطعی

از ابتدایی‌ترین تحقیقات انجام شده در زمینه تخصیص بار آلودگی توسط Liebman and Lynn (1966) انجام شد. در این مقاله، هدف تعیین حداقل سطح تصفیه متغیر کیفی BOD بود، به گونه‌ای که میزان متغیر کیفی DO در پایین‌دست در حد استاندارد نگه داشته شود. به این منظور، از روش برنامه‌ریزی پویای قطعی[۲] برای حل مسأله بهینه‌سازی استفاده شد. ReVelle et al. (1968) همین مسأله را برای حالت استفاده از برنامه‌ریزی خطی[۳] مورد بحث و بررسی قرار دادند و نتایج را با نتایج به دست آمده از روش برنامه‌ریزی پویا مقایسه نمودند و به این نتیجه رسیدند که نتایج اساساً مشابه می‌باشند.

Herbay et al. (1983) در مقاله‌ای، ایده بهره‌برداری پویا در زمان[۴] تصفیه‌خانه‌های فاضلاب مربوط به منابع آلودگی رودخانه‌ها را مطرح کردند. به این منظور، توابع هدف مربوط به هزینه‌های تصفیه با در نظر گرفتن هزینه‌های بهره‌برداری متغیر در طول فصول سال لحاظ شدند. به این ترتیب، تخصیص بار آلودگی در رودخانه به صورت فصلی انجام شد. در این مقاله، شرایط رودخانه در تمام فصول سال ماندگار[۵] و شرایط هر دوره زمانی مستقل از دوره‌های زمانی دیگر فرض شد و برای هر یک، مدل‌های کلاسیک تخصیص بار آلودگی مورد استفاده قرار گرفتند. باید توجه داشت که در این تحقیق، به علت در نظر گرفتن شرایط دائمی در تمام فصول سال، عملاً تغییرات شرایط کیفیت آب رودخانه مورد توجه قرار نگرفتند. به نظر می‌رسد عواملی چون نیاز به تعیین شرایط مستقلی از ویژگی‌های متغیرهای کمی و کیفی سیستم مانند دبی و کیفیت جریان بالادست، دبی و کیفیت جریان‌های بین‌راهی، کمیت و کیفیت بارهای آلودگی ورودی و تعیین احتمال رخداد آنها به منظور برآورد مجموع هزینه‌های سالانه، استفاده از مدل پیشنهادی را برای مدیریت کیفیت رودخانه عملاً با محدودیت‌هایی روبرو کرده است.

Burn (1989) و Burn and Lence (1992) به معرفی چندین ساختار قطعی و غیرقطعی برای بهینه‌سازی تخصیص بار آلودگی در رودخانه‌ها پرداختند. Burn and Yulianti (2001) قابلیت‌های الگوریتم حل مسأله بهینه‌سازی ژنتیک را در تخصیص قطعی بار آلودگی در رودخانه‌ها با در نظر گرفتن سه نوع فرمولاسیون مختلف مدل بهینه‌سازی برای بررسی سه نوع برخورد متفاوت با مسأله تخصیص بار آلودگی بررسی نمودند. مدل تخصیص اول با توابع هدف اقتصادی (حداقل‌سازی مجموع هزینه‌های تصفیه) و کیفیت آب (حداقل‌سازی تخطی استانداردهای کیفی آب رودخانه) و مدل تخصیص دوم با توابع هدف مربوط به هزینه و عدالت[۶] (همسان‌سازی میزان تصفیه بار آلودگی منابع آلاینده) و هر دو برای شرایط برنامه‌ریزی (planning) توسعه داده شدند و مدل سوم با توابع هدف دوگانه مربوط به کیفیت آب رودخانه و عدالت برای شرایط بهره‌برداری (operation) در نظر گرفته شده بود. مدل‌های توسعه داده شده دراین تحقیق، قطعی و غیر فصلی بودند و نتایج این مدل‌ها نشان‌دهنده کارایی مناسب الگوریتم ژنتیک در بحث تخصیص بار آلودگی در رودخانه در شرایطی که عدم قطعیت‌ها در نظر گرفته نشوند، می‌باشد.

Kerachian and Karamouz (2005) نیز پیشنهاد یک الگوریتم ژنتیک با طول کروموزم‌های متغیر، مسأله تخصیص آب بار آلودگی را به صورت چندهدفه قطعی حل کردند. آنها برای رودخانه کارون، قواعد مدیریت کیفیت آب رودخانه برای مدیریت شوری آب را ارائه دادند.

Yandamuri et al. (2006) یک مدل بهینه‌سازی چند هدفه را به منظور تخصیص بار آلودگی در رودخانه با توجه به معیارهای هزینه، عدالت و کیفیت آب پیشنهاد کردند. در این مدل، یک زیرمدل شبیه‌سازی کیفیت آب با فرض شرایط جریان با تغییرات کم و یک زیرمدل انتقال آلودگی در داخل مدل بهینه‌سازی نهفته بودند. در لایه بیرونی مدل، دو مدل بهینه‌سازی چندهدفه غیرفصلی قطعی عملکرد–هزینه و عملکرد–عدالت–هزینه قرار داشتند. در این مقاله، از الگوریتم ژنتیک چند هدفه NSGA-II[۷] برای حل مسأله بهینه‌سازی استفاده شد. در این مقاله نشان داده شد که بهبود معیار عدالت، با افزایش قابل توجه هزینه‌های تصفیه نسبت مستقیمی دارد.

Mostafavi and Afshar (2011) از الگوریتم جامعه مورچگان[۸] (ACO) با عنوان NA-ACO[۹] به منظور حل یک مسأله چند هدفه بهینه‌سازی تخصیص بار آلودگی در رودخانه استفاده کردند. در مدل توسعه داده شده، توابع هدف حداقل‌سازی شاخص تخطی کیفیت آب رودخانه و حداقل‌سازی هزینه‌ها بود و غلظت متغیر کیفی شاخص در نقاط کنترل با استفاده از مدل شبیه‌سازی QUAL2k و به ازای سناریوهای مختلف تخلیه به دست می‌آمد. از نقاط قوت این تحقیق، توسعه یک شاخص بود که از مجموع وزن‌دهی شده سه معیار مرتبط با کیفیت آب رودخانه بر اساس غلظت متغیر کیفی اکسیژن محلول، به دست می‌آمد. این سه معیار شامل تعداد دفعات تخطی، حداکثر مقدار تخطی و مجموع مقادیر تخطی غلظت DO از استاندارد، در نقاط کنترل رودخانه بود.

www.SID.ir

Archive of SID

Cho and Lee (2014) یک مدل بهینه‌سازی تخصیص بار آلودگی با توابع هدف مربوط به هزینه‌های تصفیه و رعایت عدالت و در نظر گرفتن معیارهای کیفیت آب رودخانه ارائه دادند. در این مقاله، برای در نظر گرفتن معیار عدالت، دو نوع شاخص برای تعیین درجه عدم رعایت عدالت محاسبه شد. اولین شاخص، ضریب ER-Gini[10] بود که معیار محاسبه آن، ظرفیت منابع زیست‌محیطی و بار آلودگی مربوط به هر زیرحوضه یا بخش در نظر گرفته شد. همچنین در این تحقیق، شاخص دیگری برای لحاظ کردن عدالت در توزیع منابع لازم برای انجام تصفیه و کاهش بار آلودگی در بین تخلیه‌کنندگان معرفی شد. به طور کلی، در محاسبه شاخص گینی، عدم برابری درآمدها و تفاوت بین منابع زیست‌محیطی در دسترس برای هر زیرحوضه به منظور تعیین سطح تصفیه تخلیه‌کنندگاندر نظر گرفته شده است.

در همه مطالعات یاد شده، از نگرش قطعی در تخصیص بار آلودگی در رودخانه‌ها استفاده شده بود و عدم قطعیت‌های موجود در نظر گرفته نشده بودند. در بخش بعد، به بررسی و مقایسه تحقیقات انجام شده در زمینه مدیریت کیفیت آب رودخانه‌ها از طریق تخصیص بهینه بار آلودگی با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های موجود پرداخته می‌شود.

○ مدل‌های غیرقطعی

در یک مسأله تخصیص بار آلودگی، عدم قطعیت‌های مختلفی نقش دارند. برخی از این عدم قطعیت‌ها به دلیل ویژگی‌های ذاتی پدیده‌های مرتبط در تخصیص بار آلودگی می‌باشند، مانند عدم قطعیت موجود در متغیر دبی در رودخانه که به دلیل تصادفی بودن این پدیده به وجود می‌آید. مرسوم‌ترین روش برخورد با این نوع عدم قطعیت‌ها استفاده از مدل‌های احتمالاتی است که اساس آنها همان توابع توزیع چگالی احتمال می‌باشد. گاهی برخی عدم قطعیت‌ها مربوط به نوع تفسیر ما از یک پدیده یا متغیر یا ابهام و عدم صراحت موجود در بیان آن پدیده هستند. این نوع عدم قطعیت‌ها را معمولاً با کمک اصول حاکم بر تئوری فازی مدل می‌کنند. به این ترتیب، به جای استفاده از تابع توزیع چگالی احتمال مربوط به آن متغیر، از تابع عضویت فازی آن استفاده می‌گردد. همچنین، در برخی از مدل‌های تخصیص بار آلودگی در رودخانه، به خصوص، زمانی که عدم صراحت زیادی در داده‌ها موجود باشد، از توابع بازه‌ای به منظور لحاظ کردن مقادیر متغیرهای دارای عدم قطعیت در مدل استفاده می‌شود.

گاه ابهام در مقادیر پارامترهای یک متغیر احتمالاتی با نوع تابع توزیع چگالی احتمال معلوم وجود دارد و به این ترتیب، می‌توان متغیر تصادفی مورد نظر را به صورت تابع توزیع چگالی احتمال با پارامترهای فازی در مدل لحاظ کرد. همچنین، در برخی مدل‌های توسعه داده شده به دلیل افزودن انعطاف‌پذیری بیشتر در تصمیم‌گیری، حدود بالا و پایین متغیر بازه‌ای مورد نظر به صورت فازی در نظر گرفته می‌شود. به این ترتیب، در چنین مدل‌های تخصیص بار آلودگی‌ای از متغیرهای دوگانه فازی- احتمالاتی یا فازی- بازه‌ای و ... استفاده شده است. در بخش‌های بعد، برخی از مهم‌ترین مقالات تخصیص بار آلودگی در رودخانه با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌ها به تفکیک نوع احتمالاتی، فازی، بازه‌ای، دوگانه یا چندگانه مورد بررسی قرار می‌گیرند.

○ مدل‌های احتمالاتی

Burn and McBean (1985) مسأله تخصیص بار آلودگی در رودخانه را به صورت یک مدل بهینه‌سازی تک‌هدفه با تابع هدف مربوط به نگهداشتن کیفیت آب رودخانه در سطح استاندارد و قید مربوط به هزینه‌های تصفیه مدل کردند. آنها عدم قطعیت‌های مربوط به بارهای آلودگی، جریان، زمان پیمایش و زمان انتقال بار آلودگی را از طریق در نظر گرفتن توابع توزیع چگالی احتمال مناسب برای این متغیرها در مدل لحاظ کردند و از آنالیز مونت- کارلو برای تعیین تأثیر این عدم قطعیت‌ها در شبیه‌سازی غلظت متغیر کیفی شاخص استفاده نمودند. در این تحقیق، برای حل مدل بهینه‌سازی از روش CCP[11] استفاده شد. در تحقیقی مشابه، Burn and McBean (1986) در یک مدل تخصیص بار آلودگی با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌ها، علاوه بر قیود اقتصادی، عدالت اجتماعی را نیز از طریق تخصیص درصدهای تصفیه به تخلیه‌کنندگان به صورت یک قید در مدل در نظر گرفتند.

Ellis (1987) یک مدل برنامه‌ریزی استوکستیک با محدودیت‌های شانسی[12] را برای مدیریت کیفی رودخانه‌ها ارائه نمود. متغیر تصمیم مدل مزبور درصد حذف بار BOD در تصفیه‌خانه‌ها با هدف حداقل‌سازی هزینه تصفیه و با قید حداقل شدن احتمال تخطی از حداقل DO مجاز در رودخانه می‌باشد. در این مقاله برخلاف مطالعات پیشین، علاوه بر دبی رودخانه، بار اولیه BOD، کمبود اولیه DO، دبی تخلیه‌کنندگان و میزان غلظت BOD و DO در بارهای تخلیه شده، تمامی پارامترهای معادلات استریتر- فلپس و نیز ضرایب موجود در رابطه جذب اکسیژن از هوا به صورت غیرقطعی در نظر گرفته شدند.

www.SID.ir

Archive of SID

Rossman (1989) در مقاله‌ای، با در نظر گرفتن درصدهای تصفیه یکنواخت تخلیه‌کنندگان در هر فصل سال، یک مدل فصلی تخصیص بار آلودگی در رودخانه را پیشنهاد نمود، به طوری که در این مدل، مجموع هزینه‌های سالانه تصفیه بارهای آلودگی حداقل شود و همزمان احتمال تخطی از استانداردهای کیفیت آب رودخانه با در نظر گرفتن تابع قید در مدل بهینه‌سازی در حد معین نگه داشته شود.در این مقاله، پس از تفکیک سال به دو فصل گرم و سرد که به منظور ساده‌سازی صورت گرفته است،مقادیر درصد تصفیه یکسان برای تمامی منابع آلاینده نقطه‌ای در هر فصل از سال‌های دوره زمانی مورد نظر توسط یک مدل خطی محاسبه می‌شود، به صورتی که تمامی استانداردهای کیفی رعایت گردند. سپس، توسط یک مدل بهینه‌سازی غیر خطی با اهداف حداقل‌سازی هزینه تصفیه سالانه و کمتر بودن تعداد سال‌هایی که در آنها تخطی از استانداردهای کیفی رخ می‌دهد از یک مقدار آستانه مشخص، درصدهای تصفیه یکنواخت ماهانه تعیین می‌شود. از مزایای مدل پیشنهادی، در نظر گرفتن سری زمانی مشخصات متغیرهای مربوط به کمـیت و کیفیت رودخانه و منابع آلاینده آن می‌باشد. همچنین، مهم‌ترین نقطه ضعف آن ارائه یک درصد تصفیه یکسان برای همه منابع آلاینده در هرماه می‌باشد.

Warwick and Roberts (1992) با استفاده از شبیه‌سازی مونت کارلو، عدم قطعیت‌های مهم موجود در یک مدل شبیه‌سازی تخصیص بار آلودگی را در نظر گرفتند و بر آن اساس، ریسک تخطی غلظت اکسیژن محلول از استاندارد کیفیت آب رودخانه را به ازای سیاست‌های مدیریت کیفیت آب محاسبه نمودند.

Takyi and Lence (1995) با در نظر گرفتن همبستگی بین دبی‌های کم‌آبی در فصول مختلف سال، یک مدل بهینه‌سازی- شبیه‌سازی غیرخطی تخصیص بار آلودگی فصلی مبتنی بر زنجیره مارکوف توسعه دادند. آنها همبستگی بین دبی‌های کم آبی فصلی را با استفاده از ماتریس احتمال انتقال[۱۳] مدل نمودند.
Vasquez et al. (2000) روشی را برای تخصیص بهینه بار آلودگی پیشنهاد دادند که در آن، الگوریتم بهینه‌سازی ژنتیک (GA)[۱۴] با الگوریتم FORM (Madsen et al. 1986)[۱۵] به منظور تخمین احتمال شکست سامانه تحت یک سناریوی تخصیص مشخص تلفیق می‌شد (GA-FORM). دلیل استفاده از FORM در این مقاله، کمتر بودن زمان محاسبات این مدل درتخمین تابع توزیع چگالی احتمال تجمعی شکست- از نظر احتمال تخطی از استاندارد مربوط به اکسیژن محلول- در مقایسه با آنالیز مونت-کارلو[۱۶] بوده است. تابع هدف این رویکرد بهینه‌سازی، حداقل‌سازی مجموع هزینه‌های تصفیه و جریمه مربوط به تخطی از استاندارد کیفیت آب ومتغیرهای تصادفی مورد استفاده در تخمین میزان اطمینان‌پذیری (یا به عبارتی، ریسک شکست) دمای جریان و ضریب هواگیری[۱۷] بودند. در این تحقیق نشان داده شد که رویکرد به کار رفته تقریباً از دقت رویکرد ترکیبی GA و آنالیز مونت- کارلو برخوردار است و در ضمن، کارآمدی بیشتری نسبت به آن دارد.

Ghosh and Mujumdar (2006) دو مدل به منظور حداقل‌سازی ریسک تخطی از استاندارد ارائه نمودند. در مدل اول، با عنوان حداقل‌سازی ریسک، حداقل‌سازی ریسک کیفیت ضعیف آب رودخانه در شرایطی که اهداف طرف‌های درگیر در تضاد با یکدیگر است، هدف مدل می‌باشد. مدل پیشنهادی ایشان شامل سه بخش می‌باشد: مدل شبیه‌سازی کیفیت آب، مدل تخمین ریسک به همراه آنالیز عدم قطعیت‌های فازی و استوکاستیک و یک مدل بهینه‌سازی. ایشان در این مدل از تحلیل حساسیت، آنالیز اعتبارسنجی مرتبه اول و آنالیز مونت‌کارلو برای ارزیابی ریسک فازی کیفیت ضعیف آب استفاده نمودند. از برنامه‌ریزی چندهدفه فازی[۱۸] نیز برای فرمول‌بندی مدل چندهدفه استفاده شد. ایشان به منظور حل مدل بهینه‌سازی غیرخطی حاصل، از روش PGSL[۱۹] استفاده نمودند. مدل دومی که ایشان ارائه نمودند، با عنوان مدل تخصیص بار آلودگی فازی اصلاح شده[۲۰]، براساس گشتاورهای توابع توزیع احتمال (میانگین، انحراف از معیار و چولگی) شاخص‌های فازی کیفی آب، ریسک تخطی از استاندارد را حداقل می‌نماید. در این مدل، مقادیر مناسب چولگی که منجر به ریسک فازی کم می‌شوند شناسایی می‌گردند. نتایج هر دو مدل در مطالعه موردی رودخانه Tunga-Bhadra در جنوب هندوستان با نتایج مدل تخصیص بار آلودگی فازی قطعی (FWLAM) مقایسه شدند. نتایج نشان‌دهنده اندکی افزایش در درصدهای حذف بار آلودگی نسبت به مدل قطعی می‌باشد، ولی ریسک کیفیت ضعیف آب مقدار قابل توجهی کاهش نشان می‌دهد.

Nikoo et al. (2014) برای در نظر گرفتن اثر مخزن بالادست در تخصیص بار آلودگی در رودخانه پایین‌دست یک مدل بهره‌برداری پویای استوکستیک از مخزن را با یک مدل غیرخطی بهینه‌سازی تخصیص آب و بار آلودگی در رودخانه تلفیق کردند. این مدل قادر بود که عدم قطعیت جریان ورودی به مخزن را به صورت احتمالاتی در نظر بگیرد.

○ مدل‌های فازی، بازه‌ای و ترکیبی

Sasikumar and Mujumdar (1998) یک مدل بهینه‌سازی چندهدفه فازی[۲۱] را برای مدیریت کیفی سیستم‌های رودخانه‌ای مورد

www.SID.ir

Archive of SID

بررسی قرار دادند. ایشان، در این مطالعه، اهداف کیفی سازمان‌های مسئول و تخلیه‌کنندگان بارهای آلودگی را به صورت توابع عضویت فازی در نظر گرفتند، اما سایر پارامترهای موثر در مدیریت کیفی رودخانه مانند دبی رودخانه، دبی بار آلودگی تخلیه‌کنندگان و مقدار غلظت بارهای آلودگی را به صورت قطعی در نظر گرفتند. ایشان، کارایی مدل پیشنهادی خود را با ارائه یک مثال عددی فرضی مورد بررسی قرار دادند.

Mujumdar and Sasikumar (2002) یک مدل بهینه‌سازی فازی تخصیص فصلی بار آلودگی در رودخانه با توابع محدودیت (قیود) غیرفازی را ارائه دادند. آنها رخ دادن افت کیفیت آب رودخانه را به عنوان یک رویداد فازی و عدم قطعیت مربوط به ریسک تخطی غلظت متغیر کیفی شاخص از مقدار استاندارد رابه صورت تابع توزیع چگالی احتمال یک رویداد فازی در مدل در نظر گرفتند. یکی از مزایای این مدل این بود که بر خلاف بیشتر تحقیقات دیگر که در آنها آستانه ریسک تخطی غلظت متغیر کیفی شاخص از استاندارد به صورت یک مقدار از قبل مشخص در مدل تعریف می‌شد، در این مقاله از یک بازه به صورت آستانه فازی ریسک تخطی استفاده شد. یکی از نقاط ضعف این مدل در نظر نگرفتن همبستگی بین تصفیه آلاینده‌های مختلف بود که البته اضافه کردن اثر تصفیه چندآلایندگی می‌توانست پیچیدگی مدل را بسیار افزایش دهد. به همین دلیل، این مدل برای در نظر گرفتن تصفیه آلاینده‌هایی می‌تواند به کار رود که همبستگی بین آنها در تصفیه وجود نداشته باشد.

در بیشتر مسائل تخصیص بار آلودگی و مدیریت کیفیت آب رودخانه، عدم قطعیت‌های ذاتی در سامانه به صورت توابع توزیع چگالی احتمال و از طریق تحلیل مونت- کارلو در نظر گرفته شده‌اند. از آنجا که آنالیز مونت- کارلو به خصوص دراستفاده همزمان آن به همراه یک مدل شبیه‌سازی- بهینه‌سازی می‌تواند فرآیند بسیار زمان‌بری باشد، در تحقیقی، Vemula et al. (2004) نشان دادند که چگونه می‌توان بر این مسأله غلبه کرد. به این منظور، آنها دریک مدل فازی تخصیص بار آلودگی (FWLAM)[۲۲]- که اولین بار توسط Sasikumar and Mujumdar (1998) توسعه داده شد- ریسک تخطی غلظت متغیر کیفی شاخص از استاندارد را با انجام تحلیل حساسیت[۲۳] و تحلیل اطمینان‌پذیری مرتبه اول[۲۴] برای تعیین متغیرهای تصادفی کلیدی و تعیین نقاط کنترل کلیدی در رودخانه، ارزیابی کردند. آنهابا استفاده از مدل WLA با رویکرد شبیه‌سازی- بهینه‌سازی[۲۵]- که توسط Mujumdar and Vemula (2004) ارائه شده بود- توابع توزیع فراوانی متغیرهای خروجی در نقاط کلیدی را با کاربرد آنالیز مونت- کارلو و با استفاده از متغیرهای تصادفی کلیدی ورودی به دست آوردند. نویسندگان این مقاله نیز رخ دادن افت کیفیت آب رودخانه را به عنوان یک رویداد فازی و عدم قطعیت مربوط به ریسک تخطی غلظت متغیر کیفی شاخص از مقدار استاندارد را به صورت تابع توزیع چگالی احتمال آن در مدل در نظر گرفتند.

Karmakar and Mujumdar (2006a) عدم قطعیت مربوط به توابع عضویت فازی مربوط به تخلیه‌کنندگان و سازمان متولی کنترل کیفیت آب رودخانه را با توسعه یک مدل فازی بازه‌ای (خاکستری) تخصیص بار آلودگی در رودخانه (GFWLAM)[۲۶] در مدل لحاظ کردند. در این مدل، ابهام یا عدم صراحت[۲۷] موجود در معیارهای کیفیت آب و درصد تصفیه آلاینده‌ها در قالب یک ساختار ریاضی فازی در نظر گرفته شد. عدم صراحت درحد پایین و بالای توابع عضویت فازی به صورت اعداد خاکستری[۲۸] (بازه‌ای) در نظر گرفته شد که بازه‌هایی محدود با حد پایین و بالای معلوم ولی توزیع نامعلوم بودند. به این ترتیب، گرودارن مسأله تخصیص بار آلودگی می‌توانستند مطلوبیت‌های خود را از طریق توابع فازی در یک فضای ریاضی انعطاف‌پذیرتر بیان کنند. در نهایت،درصد تصفیه‌های بهینه آلاینده‌ها به صورت اعداد بازه‌ای و نه اعداد صریح بهتصمیم‌گیرندگاناین اختیار را می‌دهد که با توجه به معیارهای اقتصادی و امکان‌پذیری[۲۹] از بین تعدادی جواب بهینه جوابی را برگزینند.

مدل توسعه داده شده چند هدفه FWLAM عموماً به جای یک جواب واحد یک مجموعه جواب دارد که این جواب‌های چندگانه لازم است به صورت معادلات پارامتری به دست آیند. Karmakar and Mujumdar (2007) یک تکنیک دو مرحله‌ای تحت عنوان GFWLAM را برای به دست آوردن همه گزینه‌ها و جواب‌های چندگانه مدل تخصیص بار آلودگی در رودخانه توسعه دادند. در گام اول بهینه‌سازی این تکنیک، درست مانند نوع قبل GFWLAM عمل می‌شود. مدل بهینه‌سازی گام دوم با هدف حداکثرسازی حد بالا و حداقل‌سازی حد پایین سطوح تصفیه آلاینده‌ها در نهایت، با افزایش حدود بازه‌ها برای مقادیر بازه‌ای حذف آلاینده‌ها، به تصمیم‌گیرنده این امکان را می‌دهد که تصمیم نهایی را با توجه به معیارهای فنی و اقتصادی و با انعطاف‌پذیری بیشتری اتخاذ کند.

Qin et al. (2007) بسط مدل برنامه‌ریزی غیرخطی فازی-بازه‌ای[۳۰] را برای مدیریت کیفی آب با وجود عدم قطعیت ارائه نمودند. در روش پیشنهادی ایشان، روش‌های فازی و اعداد بازه‌ای به منظور در نظر

www.SID.ir

Archive of SID

گرفتن عدم قطعیت‌های موجود در طرفین قیود غیرخطی، در قالب یک چارچوب با هم ادغام شدند. ایشان از روش خطی‌سازی برای حل مدل بهینه‌سازی غیرخطی استفاده کردند. نتایج به کارگیری مدل در مطالعه موردی بخشی از رودخانه Xiangjiang در چین نشان‌دهنده تأثیر مثبت در نتایج به ازای افزایش سطح خطی‌سازی می‌باشد.

Qin et al. (2009) مدل تخصیص بار آلودگی بازه‌ای توانی (درجه دو) تحت عنوان IQWLAM[۳۱] ارائه کردند که در آن درصد تصفیه‌های مربوط به متغیرهای کیفیت آب CBOD[۳۲] و NBOD[۳۳] در نقاط تخلیه بار آلودگی تعیین می‌شدند. در این مدل، هدف حداقل‌سازی کل هزینه‌های تصفیه بود به نحوی که همزمان استانداردهای تخلیه پساب و استانداردهای کیفیت آب رودخانه رعایت شوند. در مدل شبیه‌سازی به کار رفته رودخانه به بازه‌های مختلف تقسیم می‌شد و ماتریس‌های انتقالی مربوط به کیفیت آب با فرض حاکم بودن شرایط پایدار استخراج می‌شدند. این ماتریس‌ها و بردارهای مربوط به کیفیت آب در مدل بهینه‌سازی تخصیص بار آلودگی به عنوان قیود مورد استفاده قرار گرفته‌اند. عدم قطعیت‌های مربوط به پارامترهای محاسبه کیفیت آب، توابع هزینه و دستورالعمل‌های زیست‌محیطی به صورت بازه‌ای و توابع هزینه به فرم توانی[۳۴] در مدل در نظر گرفته شده‌اند. در این مدل، جواب‌های غیرقطعی طیفی از گزینه‌های پتانسیل تصفیه فاضلاب را دربردارند. به این ترتیب، این مدل می‌تواند در انتخاب گزینه تصمیم با استفاده از ترکیب‌های مختلف متغیرهای تصمیم و بازه‌های جواب قابل قبول مفید باشد.

Rehana and Mujumdar (2009) یک مدل تخصیص بار آلودگی غیر صریح فازی تحت عنوان IFWLAM[۳۵] توسعه دادند که در آن، عدم قطعیت اصلی موجوداز نوع دانش ناکافی[۳۶] بود. در این مقاله، ریسک فازی غیر صریح[۳۷] افت کیفیت آب رودخانه در حالتی که پارامترها دارای عدم قطعیت ناشی از فقدان جزئی اطلاعات بودند، توسط آنالیز مونت- کارلو با ورودی‌های غیرصریح ارزیابی شد. همچنین، یک مدل بهینه‌سازی چند هدفه فازی با اپراتور حداکثر- حداقل[۳۸] توسعه داده شد که عموماً نتیجه آن به جای یک جواب چند جواب بود. با استفاده از چنین مدلی همه گزینه‌های تصمیم در نظر گرفته می‌شوند و بازه قابل قبولی برای سطح تصفیه آلاینده‌ها- در حالی که ریسک فازی تخطی از استانداردها در نتیجه آن در حد مطلوب باشد- در اختیار تصمیم‌گیرنده قرار می‌گیرد.

Ghosh and Mujumdar (2010) با ترکیب دو مدل FWLAM و MFWLAM (Ghosh and Mujumdar, 2006)[۳۹]، یک مدل جدید تخصیص بار آلودگی در رودخانه توسعه دادند. مدل بهینه‌سازی به کار رفته یک مدل دو هدفه با هدف حداکثرسازی آستانه قابل قبول و حداقل‌سازی تخطی از استانداردهابود. مدل MFWLAM ریسک کیفیت ضعیف آب را به طور قابل توجهی کاهش می‌دهد ولی از طرفی، با اضافه شدن قیود بیشتر به این مدل در مقایسه با مدل FWLAM، بیشینه حداقل مطلوبیت سامانه افت می‌کند. در این مقاله با تلفیق دو مدل یاد شده و با افزایش درجه آزادی قیود مربوط به کیفیت آب (اجازه تخطی از استانداردهای کیفیت آب تا حدی داده می‌شود) جواب‌های مدل MFWLAM با در نظر گرفتن حداکثرسازی سطح مطلوبیت و حداقل‌سازی میزان تخطی‌ها بهبود می‌یابد.

Nikoo et al. (2013) از روش تبدیل فازی[۴۰] برای در نظر گرفتن عدم قطعیت موجود در ورودیهای یک مدل بهینه‌سازی تخصیص همزمان آب و بار آلودگی در رودخانه‌ها استفاده کردند. آنها با در نظر گرفتن امکان ائتلاف بین مصرف‌کنندگان آب در بخش کشاورزی‌ای که بار آلودگی خود را به رودخانه تخلیه می‌کنند، داد و ستدهای مالی بین آنها را نیز با استفاده از تئوری بازی‌های همکارانه[۴۱] مدل‌سازی نمودند.

Tavakoli et al. (2015) برای تخصیص بار آلودگی در رودخانه‌های پذیرنده زهابهای کشاورزی، یک مدل بهینه‌سازی – شبیه‌سازی پیشنهاد نمودند که در آن عدم‌قطعیتهای مهم به صورت احتمالاتی یا فازی در نظر گرفته می‌شوند. آنها از مدل شبیه سازی SWAP[۴۲] برای تخمین کمیت و کیفیت زهابهای کشاورزی و از مدل QUAL2Kw برای شبیه‌سازی کیفیت آب رودخانه استفاده کردند.

روش‌های حل مسأله بهینه‌سازی تخصیص بار آلودگی

○ برنامه‌ریزی خطی

در مسائل تخصیص بار آلودگی با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌ها، عموماً عواملی دخالت دارند که مسأله بهینه‌سازی را پیچیده می‌کنند و معمولاً با استفاده از روش‌های برنامه‌ریزی خطی قابل حل نیستند. از این رو، در اکثر تحقیقات انجام شده در زمینه تخصیص بار آلودگی در رودخانه با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌ها با کمک روش‌های بهینه‌سازی غیرخطی به حل مسأله پرداخته شده است. در این بخش، به مرور برخی از مهم‌ترین مقالات در زمینه مدیریت کیفیت آب

www.SID.ir

Archive of SID

رودخانه با استفاده از روش‌های برنامه‌ریزی خطی پرداخته می‌شود. تحقیقات اولیه در زمینه تخصیص بار آلودگی در رودخانه‌ها با استفاده از برنامه‌ریزی خطی توسط Loucks et al. (1967) و ReVelle et al. (1968) انجام شد. در مقالاتی دیگر، Arbabi and Elzinga (1975)، Herbay et al. (1983)، Rossman (1989) و Yang et al. (2011) از روش برنامه‌ریزی خطی برای مدیریت کیفی سیستم‌های رودخانه‌ای استفاده کردند. در سالهای اخیر نیز به خصوص هنگام تحلیل عدم‌قطعیت‌های موجود در مسأله تخصیص بار آلودگی به روشهای بازه‌ای یا فازی، از نوعی برنامه‌ریزی خطی استفاده شده است. به عنوان نمونه می‌توان به Karmaker and Mujumdar (2006)، Xie et al. (2011) و Tavakoli et al. (2014) اشاره کرد.

○ برنامه‌ریزی غیرخطی

روش‌های برنامه‌ریزی غیرخطی به دلیل داشتن انعطاف‌پذیری بیشتر در مواردی که مؤلفه‌های موجود در سامانه زیاد هستند و فرم مسأله پیچیده‌تر است، در حل مسائل تخصیص بهینه بار آلودگی در رودخانه نسبتاً بیشتر مورد توجه بوده‌اند و کاربردهای بیشتری داشته‌اند. در این بخش، به برخی از مهم‌ترین تحقیقات گذشته در زمینه استفاده از برنامه‌ریزی خطی در حل مسائل بهینه‌سازی تخصیص بار آلودگی در رودخانه که در جدول ۱ هم دسته‌بندی شده‌اند، اشاره می‌شود. در بخش‌های قبل، به این مقالات به طور کامل‌تر پرداخته شده است.

Liebman and Lynn (1966) از روش برنامه‌ریزی پویای قطعی[۴۳] و Lohani and Hee (1983) از روش برنامه‌ریزی پویای استوکستیک برای حل مسأله بهینه‌سازی تخصیص بار آلودگی در رودخانه استفاده کردند. همچنین، Burn and Mc Bean (1985) و Burn and Mc Bean (1986) به منظور تخصیص بار آلودگی در رودخانه از روش برنامه‌ریزی با محدودیت شانسی (Chance constrained programming) استفاده کردند. از مهم‌ترین تحقیقات انجام شده در زمینه کاربرد روش الگوریتم ژنتیک در مسأله بهینه‌سازی تخصیص بار آلودگی در رودخانه می‌توان به Vasquez et al. (2000) و Burn and Yulianti (2001) اشاره کرد. همچنین، Yandamuri et al. (2006) و Nikoo et al. (2012a) به این منظور از نوع خاصی از این الگوریتم با عنوان NSGAII، Saadatpour and Afshar (2007) از الگوریتم ژنتیک با جمعیت طبقه‌بندی‌شده (Classified Population Genetic Algorithm) و Mujumdar and Vemula (2004) و Vemula et al. (2004) از ترکیب GA با یک روش در نظر گرفتن قیود مسأله تحت عنوان روش HM[۴۴] در حل مسأله بهینه‌سازی تخصیص بار آلودگی در رودخانه استفاده کردند.

از دیگر مقالاتی که در آنها از الگوریتم ژنتیک به عنوان روش حل مسأله غیرخطی تخصیص بار آلودگی استفاده شده است، می‌توان به مقالات Nikoo et al. (2013)، Mahjouri and Abbasi ((2014) و Cho and Lee (2014) اشاره کرد. همچنین، در مقالاتی دیگر، Karmakar and Mujumdar (2007)، Rehana and Mujumdar (2009) و Ghosh and Mujumdar (2010) از یک روش جستجوی تصادفی تحت عنوان PGSL[۴۵] برای حل مسأله WLA در رودخانه به کار بردند. یکی دیگر از روش‌های بهینه‌سازی استفاده شده برای حل مسأله تخصیص بار آلودگی، برنامه‌ریزی توانی (درجه دو) است که مثلاً در مقاله Qin et al. (2009) به کار گرفته شده است.

تخصیص همزمان آب و بار آلودگی در رودخانه

همانطور که در شکل ۱ اشاره شد، مدل‌های تخصیص بار آلودگی به شکل مجزا و همچنین، به شکل تلفیقی با مدل‌های تخصیص آب تدوین شده‌اند. این مدلها اغلب به منظور مدیریت زهابهای کشاورزی که به رودخانه‌ها تخلیه می‌شوند تدوین شده‌اند. در این بخش، به بررسی مدل‌های تخصیص همزمان آب و بار آلودگی پرداخته می‌شود.

Nikoo et al. (2013) مدلی توسعه دادند که در آن از روش تبدیل فازی به منظور تخصیص همزمان آب و بار آلودگی در رودخانه با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌ها استفاده می‌شد. همچنین، برای رعایت اصل عدالت، با استفاده از تئوری بازی‌های همکارانه و با در نظر گرفتن همه ائتلاف‌های ممکن بین بازیکنان (تخلیه‌کنندگان بار آلودگی)، سود فازی حاصل از صرفه‌جویی در میزان تصفیه با انتخاب هر گزینه تصفیه و تشکیل ائتلاف مورد نظر را بین اعضای ائتلاف تقسیم نمودند. به این ترتیب، علاوه بر معیار عدالت، معیار هزینه نیز با انتخاب بهینه‌ترین حالت تصفیه بار آلودگی تخلیه‌کنندگان و سپس، تسهیم سودهای به دست آمده در هر ائتلاف تأمین می‌شد.

Nikoo et al. (2014) با تلفیق یک مدل بهره‌برداری پویای استوکستیک از مخزن و یک مدل غیرخطی بهینه‌سازی تخصیص آب و بار آلودگی در رودخانه پایین‌دست، یک مدل جامع مدیریت آب و زهاب کشاورزی در سیستم‌های رودخانه – مخزن تدوین کردند.

www.SID.ir

Archive of SID

آنها با استفاده از چندین مدل شبیه‌سازی هوشمند، قواعد تخصیص آب و بارآلودگی را نیز تدوین کردند.

Liu et al. (2014) در قالب یک مطالعه موردی در چین یک مدل دوهدفه قطعی برای تخصیص همزمان آب و بار آلودگی توسعه دادند. آنها برای مدل‌سازی تغییرات دبی جریان در رودخانه از یک مدل هیدرودینامیکی استفاده کردند. برای حل مدل بهینه‌سازی تخصیص آب و بار آلودگی از مدل معروف NSGA-II استفاده کردند.

Tavakoli et al. (2014) با استفاده از تحلیل فاکتوریل جزئی[۴۶] به ارزیابی عدم قطعیتهای مهم در مسأله تخصیص همزمان آب و بار آلودگی در رودخانه‌ها پرداختند. آنها برای شبیه‌سازی کمیت و کیفیت زهابهای کشاورزی وارد شده به رودخانه از مدل شبیه‌سازی SWAP استفاده کردند. بر اساس نتایج این مقاله، می‌توان با استفاده از تحلیل فاکتوریل جزئی متغیرها و پارامترهای مهم را شناسایی کرد و تنها عدم قطعیت آنها را در بهینه‌سازی تخصیص آب و بار آلودگی در نظر گرفت. با اینکار هزینه محاسباتی مدل بهینه‌سازی به میزان قابل توجهی کاهش خواهد یافت.

Tavakoli et al. (2015) یک متدولوژی فازی برای بهینه‌سازی تخصیص آب و بار آلودگی در رودخانه ارائه دادند که در آن، از یک روش برنامه‌ریزی فازی دو مرحله‌ای (ITSFP)[۴۷] به منظور لحاظ کردن عدم قطعیت‌ها استفاده شد. در این مقاله، از برنامه‌ریزی خطی تکرارشونده (ILP)[۴۸] برای حل مدل بهینه‌سازی غیرخطی استفاده شده است. همچنین، با استفاده از نرم‌افزار SWAT کمیت و کیفیت جریان‌های برگشتی کشاورزی نیز تعیین شده است.

نحوه برخورد با مطلوبیت‌های گروداران در مدل تخصیص بار آلودگی

○ مدل‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره و روش‌های انتخاب اجتماعی

از جمله تحقیقاتی که در آنها از مدل‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره در بحث تخصیص بار آلودگی در رودخانه استفاده شده است می‌توان به Burn and Mc Bean (1985, 1986)، Takyi and Lence (1995)، Vasquez et al. (2000)، Mujumdar and Sasikumar (2002)، Karmaker and Mujumdar (2006) و Saadatpour and Afshar (2007) اشاره کرد. همچنین، در سال‌های اخیر، Mahjouri and Bizhani-Manzar (2013) از روش چانه‌زنی بازگشتی[۴۹] به منظور تخصیص عادلانه و بهینه بار آلودگی در رودخانه استفاده کردند. در این مقاله، از دو روش چانه‌زنی بازگشتی با توافق آراء[۵۰] و چانه‌زنی بازگشتی با بن‌بست[۵۱] برای به دست آوردن یک ماتریس توافق[۵۲] که دربردارنده یک سری گزینه‌های تصفیه مربوط به تخلیه‌کنندگان بار آلودگی در رودخانه که از نظر رعایت مطلوبیت‌های گروداران قابل قبول بود، استفاده کردند.

Mahjouri and Abbasi (2014) یک مدل تخصیص بار آلودگی در رودخانه با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های مربوط به کمیت و کیفیت آب رودخانه در بالادست و بارهای آلودگی ورودی ارائه دادند. در این مقاله، از توابع عضویت فازی برای برخی متغیرهایی که اطلاعات کمی از آنها در دست بود و از توابع توزیع چگالی احتمال با پارامترهای فازی به منظور لحاظ کردن عدم قطعیت‌های ذاتی برخی متغیرها استفاده شد و وضعیت کیفیت آب رودخانه با توسعه یک شاخص فازی- احتمالاتی کیفیت آب بررسی گردید. در این تحقیق، از قابلیت‌های برخی روش‌های گزینش اجتماعی برای به دست آوردن بهترین گزینه تصفیه تخلیه‌کنندگان بار آلودگی از بین گزینه‌های به دست آمده از مدل بهینه‌سازی توسعه داده شده با توابع هدف کیفیت و هزینه، استفاده شده است. به این ترتیب، علاوه بر معیارهای اقتصادی و کیفیت آب، معیار عدالت اجتماعی هم در نظر گرفته شده است.

بیژنی منظر و مهجوری (۱۳۹۲) مطلوب‌ترین سیاست تخصیص بار آلودگی را با شبیه‌سازی فضای مذاکره و چانه‌زنی بین تخلیه‌کنندگان بار آلودگی با استفاده از روش‌های مختلف گزینش اجتماعی مانند روش چانه‌زنی بازگشتی، تابع چانه‌زنی نش و روش گزینش اجتماعی بردا تعیین کردند. سپس، گزینه‌های انتخاب شده توسط این روش‌ها را با توجه به هزینه‌های تخصیص‌یافته به تخلیه‌کنندگان و مقدار تخطی شاخص کیفی از استاندارد، با یکدیگر مقایسه کردند.

ذوالفقاری‌پور و احمدی (۱۳۹۳) به منظور حداقل‌سازی هزینه‌های حفظ کیفیت محیط زیست و تأمین معیارهای کیفیت آب، یک مدل تخصیص بار آلودگی با کاربرد روش‌های گزینش اجتماعی توسعه دادند. در این مقاله، هر یک از تخلیه‌کنندگان ابتدا گزینه‌های تصفیه را بر اساس هزینه‌های کل که شامل هزینه‌های تصفیه و جریمه تخطی از استاندارد بود، رتبه‌بندی کردند. سپس، گزینه مطلوب با استفاده از روش‌های گزینش اجتماعی مختلف انتخاب شد.

www.SID.ir

Archive of SID

○ مدل‌های مبتنی بر تئوری بازی‌ها

از آنجا که در مسأله تخصیص بار آلودگی تخلیه‌کنندگان بار آلودگی و سازمانهای مسؤول حفاظت کیفیت آب و محیط زیست با اهداف معمولاً متضادی حضور دارند، در سالهای اخیر این مسأله با استفاده از تئوری بازیهای نیز بررسی شده است. در این بخش به نمونه‌هایی از مطالعات انجام شده در این زمینه اشاره شده است:

Nikoo et al. (2012b) یک مدل تخصیص بار آلودگی در رودخانه با در نظر گرفتن معیار عدالت اجتماعی از طریق کاربرد تئوری بازی‌های همکارانه و با در نظر گرفتن برخی عدم قطعیت‌های موجود در سامانه ارائه دادند. آنها یک مدل بهینه‌سازی دو هدفه با اهداف نگه داشتن سطح تصفیه تخلیه‌کنندگان در حد متوسط و کاهش ریسک فازی کیفیت نامطلوب آب در رودخانه را با استفاده از الگوریتم حل NSGAII توسعه دادند. سپس، برای انتخاب بهترین گزینه (بهترین جواب غیرپست[۵۳]) سطوح تصفیه تخلیه‌کنندگان از بین جواب‌های موجود در جبهه پرتو[۵۴]،از یک بازی ماتریسی با جمع غیرصفر فازی[۵۵] استفاده نمودند. در این مقاله، معیار عدالت اجتماعی[۵۶] از طریق تشکیل ائتلاف‌هایی بین تخلیه‌کنندگان و تسهیم هزینه‌های تصفیه بین اعضای ائتلاف[۵۷] و پرداخت‌های جانبی[۵۸] در نظر گرفته شد. در نهایت، با تشکیل سناریوهای مختلف بار آلودگی برای آموزش و تست مدل شبکه‌های بیزی (BNs)[۵۹] و ماشین‌های بردار پشتیبان احتمالاتی (PSVMs)[۶۰]، قوانین احتمالاتی تخصیص بار آلودگی در شرایط واقعی[۶۱] توسعه داده شدند.

Abed-Elmdoust and Kerachian (2012) از یکی از انواع بازی‌های همکارانه تحت عنوان بازی‌های سیگنالی تکراری[۶۲] با اطلاعات ناقص برای در نظر گرفتن این امر که گروداران (بازیکنان) اطلاعات ناقصی در مورد مشخصات بارهای آلودگی و استراتژِهای تصفیه سایر بازیکنان داشته باشند، استفاده کردند. نتایج آنها نشان داد که با استفاده از این نوع بازی، علاوه بر در نظر گرفتن برخی عدم قطعیت‌ها یا عدم صراحت‌های موجود، با رسیدن به حالت تعادل کامل بیزی[۶۳]، اصل عدالت درتخصیص بار آلودگی، تا حد زیادی می‌تواند تأمین شود.

Nikoo et al. (2013) مدلی توسعه دادند که در آن از روش تبدیل فازی به منظور تخصیص همزمان آب و بار آلودگی در رودخانه با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌ها استفاده می‌شد. همچنین، برای رعایت اصل عدالت، با استفاده از تئوری بازی‌های همکارانه و با در نظر گرفتن همه ائتلاف‌های ممکن بین بازیکنان (تخلیه‌کنندگان بار آلودگی)، سود فازی حاصل از صرفه‌جویی در میزان تصفیه با انتخاب هر گزینه تصفیه و تشکیل ائتلاف مورد نظر را بین اعضای ائتلاف تقسیم نمودند. به این ترتیب، علاوه بر معیار عدالت، معیار هزینه نیز با انتخاب بهینه‌ترین حالت تصفیه بار آلودگی تخلیه‌کنندگان و سپس، تسهیم سودهای به دست آمده در هر ائتلاف تأمین می‌شد.

Malakpour-Estelaki et al. (2015) با پیشنهاد یک بازی تکاملی، توابع جریمه‌ای برای تخطی از کیفیت آب در رودخانه ارائه دادند که بر آن اساس رفتار غیرهمکارانه تخلیه‌کنندگان بار آلودگی در رودخانه به صورتی خواهد بود که استانداردهای کیفیت آب تا حد زیادی رعایت می‌شوند. آنها نشان دادند توابع جریمه موجود برای حفاظت کیفیت آب رودخانه‌ها در ایران کفایت لازم برای کنترل آلودگی در این اکوسیستم‌های مهم را ندارد. اخیراً تئوری بازیهای همکارانه توسط Tavakoli et al. (2015) نیز در تخصیص بار آلودگی در رودخانه‌ها نیز استفاده شده است.

نوع مدل شبیه‌سازی کیفیت آب رودخانه

به منظور تخمین مقادیر بهینه سهم میزان تصفیه و تخلیه بار آلودگی در رودخانه برای هر تخلیه‌کننده، لازم است مقادیر غلظت متغیرهای کیفی شاخص رودخانه که در مسأله بهینه‌سازی به کار می‌روند، به ازای مقادیر مختلف بارهای آلودگی مورد تخلیه تعیین شوند. به این منظور، در تحقیقات مربوط به تخصیص بار آلودگی در رودخانه، از روش‌های مختلفی برای محاسبه غلظت متغیرهای کیفی شاخص استفاده شده است. در این بخش، به مرور اجمالی برخی مقالات در این زمینه پرداخته می‌شود. لازم به ذکر است، به جزئیات بیشتری از این مقالات در جدول ۱ یا بخش‌های قبل به طور مفصل‌تر پرداخته شده است.

Burn and Mc Bean (1985)، Liebman and Lynn (1966)، Rossman (1989)، Burn and Mc Bean (1986)، Karmaker and Mujumdar (2006)، Vasquez et al. (2000) و Karmakar and Mujumdar (2007) معادلات استریتر و فلپس (Streeter and Phelps, 1925) را به طور مستقیم به منظور شبیه‌سازی کیفیت آب رودخانه در مسأله WLA به کار گرفتند. همچنین، Burn and Yulianti (2001)، Mujumdar and Vemula (2004)، Vemula et al. (2004)، Saadatpour and Afshar (2007) و Abed-Elmdoust and Kerachian (2012) از مدل شبیه‌سازی QUAL2E برای

www.SID.ir

Archive of SID

شبیه‌سازی غلظت متغیرهای کیفی شاخص در رودخانه در مسأله WLA استفاده کردند.

از دیگر تحقیقات انجام شده می‌توان به Tavakoli et al. (2015) که در آن از مدل‌های QUAL2Kw و SWAP (Soil, Water, Atmosphere, and Plant) استفاده شده بود و همینطور به Mahjouri and Abbasi (2014) اشاره کرد که در آن از ضرایب انتقال مربوط غلظت متغیر کیفی شاخص در رودخانه– به دست آمده از مدل شبیه‌سازی Qual2kw استفاده شده بود.

در مقالاتی دیگر، Rehana and Mujumdar (2009) و Ghosh and Mujumdar (2010) با استفاده از روش تفاضل محدود رو به عقب[۶۴]، و همچنین، Qin et al. (2009)، از مدل شبیه‌سازی چند قطعه‌ای (Multi-Segment Simulation Model, O'Connor and Dobbins, 1958) غلظت متغیرهای کیفی شاخص را در مسأله WLA در رودخانه شبیه‌سازی کردند.

جمع‌بندی و چشم‌اندازهای موجود برای مطالعات آتی

در این مقاله، مهم‌ترین تحقیقات انجام شده در زمینه تخصیص بار آلودگی در رودخانه‌ها بررسی شدند. این مقالات با توجه به مواردی مانند ساختار مدل‌های به کار رفته، روش حل مسأله بهینه‌سازی، چگونگی در نظر گرفتن عدم قطعیت‌ها، نحوه برخورد با مطلوبیت‌های گروداران و نوع مدل شبیه‌سازی کیفیت آب رودخانه، دسته‌بندی و بررسی شدند. مطالعه مقالات موجود نشان می‌دهد که در زمینه تحلیل و مدل‌سازی عدم قطعیت‌ها هنوز زمینه تحقیقاتی خوبی وجود دارد و می‌توان با استفاده از نوآوری موجود در زمینه تحلیل عدم قطعیت (مانند روشهای مبتنی بر مونت‌کارلوی زنجیره مارکوفی[۶۵]) عدم قطعیت‌های موجود را بهتر در تصمیم‌گیری‌ها در نظر گرفت.

در بحث مدیریت کیفیت آب رودخانه‌ها، شبیه‌سازی رفتار گروداران بخصوص تخلیه‌کنندگان بار آلودگی با گذشت زمان و تعامل و روابط متقابل آنها می‌تواند تأثیر بسزایی در واقعی‌بودن خروجی مدل‌ها داشته باشد. بررسی پیشینه مطالعات نشان می‌دهد که تحقیقات انجام شده در این زمینه بسیار محدود هستند. به عنوان پیشنهادی برای تحقیقات آتی می‌توان به کاربرد مدل‌های عامل بنیان (Agent-based models) در مسأله تخصیص بار آلودگی اشاره کرد.

در بیشتر مقالات موجود در زمینه مدیریت کیفیت آب رودخانه‌ها با توجه به مقادیر مختلف بارهای آلودگی تخلیه‌شده تنها یک و در برخی موارد دو متغیر کیفیت آب مورد شبیه‌سازی قرار گرفته‌اند. در نظر گرفتن انواع مختلف متغیرهای کیفیت آب و اندرکنش آنها می‌تواند نقش مهمی در بهبود و دقیق‌تر شدن نتایج مدل‌های تخصیص بار آلودگی در رودخانه به خصوص در مواردی که منابع آلودگی متفاوت در طول رودخانه موجود باشند، داشته باشد. همچنین بر این اساس، سیاست‌های مدیریت کیفیت آب رودخانه نیز می‌تواند به صورت چندمتغیره تدوین و اعمال شوند. البته در این صورت، به دلیل افزایش تعداد متغیرهای شبیه‌سازی و افزایش زمان اجرای مدل تخصیص، توسعه و کاربرد مدل‌های شبیه‌سازی و بهینه‌سازی با هزینه محاسباتی کمتر ضروری به نظر می‌رسد.

در بخش‌های قبل، مقالات محدودی نیز بررسی شدند که در آنها تخصیص همزمان آب و بار آلودگی صورت گرفته بود. بدیهی است رودخانه‌ها علاوه بر این که به عنوان منابع پذیرنده آلودگی، می‌توانند از ظرفیت پذیرش بار آلودگی و خودپالایی خوبی برخوردار باشند، به عنوان مهم‌ترین منابع تأمین آب همان تخلیه‌کنندگان محسوب می‌شوند. از آنجا که جامع‌نگری در بحث مدیریت منابع آب امری ضروری است، مدل‌های تخصیص بار آلودگی که در آنها تخصیص آب رودخانه هم به طور همزمان صورت می‌گیرد، بالقوه مدل‌های کاراتر و واقع‌گرایانه‌تری هستند. همچنین، تجارت آب و مجوزهای تخلیه نیز به عنوان روشی تکمیل‌کننده در بحث تخصیص بار آلودگی در رودخانه‌ها می‌تواند زمینه تحقیقاتی گسترده‌ای در سالهای آتی باشد.

از آنجا که در یک مسأله تخصیص بار آلودگی در رودخانه، طرف‌های درگیر یا گروداران مختلفی با مطلوبیت‌ها و محدودیت‌های متضادی شرکت دارند. به منظور لحاظ کردن اولویت‌های گرودارن و تأمین رضایت آنها، تئوری بازی‌ها می‌تواند به عنوان ابزاری کارآمد به کار رود، توصیه می‌شود در تحقیقات آتی، به این منظور با مدل‌سازی دقیقتر مطلوبیت‌ها و محدودیتهای گروداران، از روش‌های مبتنی بر تئوری بازی‌های غیرهمکارانه برای مدل‌سازی بهتر مسأله استفاده شود.

پی نوشت‌ها

1-Stakeholders
2-Deterministic Dynamic Programming
3-Linear Programming
4-Time Varying Operation
5-Steady State

www.SID.ir

Archive of SID

6-Equity
7-Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm
8-Ant-Colony Algorithm
9-Non-Dominated Archiving Multi-Colony Ant Algorithm (NA-ACO)
10-Environmental Resource-based Gini
11-Chance Constraint Programming
12-Chance-Constraint Stochastic Model
13-Transition Probability Matrix
14-Genetic Algorithm
15-First-Order Reliability Method
16-Monte Carlo Analysis
17-Reaeration Coefficient
18-Fuzzy Multiobjective Programming
19-Probabilistic Global Search Laussane (PGSL)
20-Modified Fuzzy Waste Load Allocation Model (MFWLAM)
21-Fuzzy Waste Load Allocation Model (FWLAM)
22-Fuzzy Waste Load Allocation Model
23-Sensitivity Analysis
24-First-order Reliability Analysis (FORA)
25-Simulation-Optimization Approach
26-Grey Fuzzy Waste Load Allocation Model
27-Imprecision
28-Grey Numbers
29-Feasibility
30-Interval-Fuzzy Nonlinear Programing (IFNP)
31-Interval Quadratic Waste Load Allocation Model
32-Carbonaceous Biochemical Oxygen Demand
33-Nitrogenous Biochemical Oxygen Demand
34-Quadratic Form
35-Imprecise Fuzzy Waste Load Allocation Model
36-Partial Ignorance
37-Imprecise Fuzzy Risk
38-Max-Min
39-Modified Fuzzy Waste Load Allocation Model
40-Fuzzy Transformation
41-Cooperative Games
42-Soil, Water, Atmosphere and Plant (SWAP)
43-Deterministic Dynamic Programming
44-Homomorphous Mapping (HM)
45-Probabilistic Global Search Lausanne (PGSL)
46-Fractional Factorial Analysis
47-Interactive Two-stage Stochastic Fuzzy Programming
48-Iterative Linear Programming (ILP)
49-Fallback Bargaining
50-Unanimity Fallback Bargaining
51-Fallback Bargaining with Impasse
52-Compromise Matrix
53-Non-Dominated Solution
54-Pareto Front
55-Fuzzy Non-zero Sum Bimatrix Game
56-Equity
57-Coalition
58-Side Payments
59-Bayesian Networks
60-Probabilistic Support Vector Machines
61-Real-Time Waste Load Allocation Rules
62-Iterated Signaling Games
63-Perfect Bayesian Equilibrium
64-Backwards Finite Difference Technique
65-Markov Chain Monte Carlo

۵- مراجع

بیژنی منظر م، مهجوری ن (۱۳۹۲) تخصیص بار آلودگی در رودخانه زرجوب: کاربرد روش گزینش اجتماعی بُردا و تابع چانه‌زنی نَش. تحقیقات منابع آب ایران، شماره ۳، ۷۴-۵۹.

ذوالفقاری‌پور م، احمدی ا (۱۳۹۳) تدوین سیاست‌های تخصیص بار آلودگی در رودخانه‌ها با استفاده از رویکرد گزینش اجتماعی. آب و فاضلاب، شماره ۶: ۴۶-۳۶.

Abed-Elmdoust A, Kerachian R (2012) Water quality management under incomplete information: application of an N-person iterated signaling game. Environmental Monitoring and Assessment 184:5875–5888.

Arbabi M, Elzinga J (1975) A General approach to sream water quality modeling. Water Resources Research 11(2):191-196.

Burn DH (1989) Water-quality management through combined simulation-optimization approach. Journal of Environmental Engineering 115(5):1011–1024.

Burn DH, Lence BJ (1992) Comparison of optimization formulation for waste load allocation. Journal of Environmental Engineering 118(4):597–612.

Burn DH, McBean EA (1985) Optimization modeling of water quality in an uncertain environment. Water Resources Research 21(7):934-940.

Burn DH, McBean EA (1986) Linear stochastic optimization applied to biochemical oxygen demand-dissolved oxygen modeling. Canadian Journal of Civil Engineering 13:249-254.

Burn DH, Yulianti S (2001) Waste-load allocation using genetic algorithms. Journal of Water Resources Planning and Management 127(2):121-129.

Camp TR (1963) Water and its impurities, Rheinhold, New York.

Cardwell H, Ellis H (1993) Stochastic dynamic programming models for water quality management. Water Resources Research 29(4):803-813.

Chang NB, Chen HW, Shaw DG, Yang CH (1997) Water pollution control in river basin by interactive fuzzy interval multi-objective programming.

www.SID.ir

Archive of SID

Karmakar S, Mujumdar P (2007) A two-phase grey fuzzy optimization approach for water quality management of a river system. Advances in Water Resources 30:1218-1235.

Kerachian R, Karamouz M (2005) Waste load allocation model for seasonal river water quality management: application of sequential dynamic genetic algorithms. Scientia Iranica 12(2):117-130.

Lence BJ, Eheart JW, Brill ED (1990) Risk equivalent seasonal discharge programs for multidischarger streams. Journal of Water Resources Planning and Management 116(2):170-186.

Lence BJ, Takyi AK (1992) Data requirements for seasonal discharge programs: an application of a regionalized sensitivity analysis. Water Resources Research 28(7):1781-1789.

Liebman JC, Lynn WR (1966) The optimal allocation of stream dissolved oxygen. Water Resources Research 2(3):581-591.

Liu Y, Yang P, Hu C, Guo H (2008) Water quality modeling for load reduction under uncertainty: A Bayesian approach. Water Research 42:3305-3314.

Liu D, Guo S, Shao Q, Jiang Y, Chen X (2014) Optimal allocation of water quantity and waste load in the Northwest Pearl River Delta, China. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment 28(6):1525-1542.

Lohani BN, Hee KB (1983) A CCDP model for water quality management in the Hsintien river in Taiwan. International Journal of Water Resources Development 1(2):91-114.

Loucks DP, ReVelle CS, Lynn WR (1967) Linear programming models for water pollution control. Management Science 14(4):166-181.

Madsen HO, Krenk S, Lind NC (1986) Methods of structural safety. Prentice-Hall Englewood Cliffs, NewJersey, USA.

Mahjouri N, Abbasi M-R (2014) Waste load allocation in rivers under uncertainty: application of social choice procedures. Environmental Monitoring and Assessment 187(2):1-15.

Mahjouri N, Bizhani-Manzar M (2013) Waste load allocation in rivers using Fallback Bargaining. Water Resources Management 27(7):2125-2136.

Malakpour-Estelaki S, Abed-Elmdoust A, Kerachian R (2015) Developing environmental penalty functions for river water quality management: application of evolutionary game theory. Environmental Earth Sciences 73(8):4201–4213.

Journal of Environmental Engineering 123(12):1208-1216.

Cho JH, Lee JH (2014) Multi-objective waste load allocation model for optimizing waste load abatement and inequality among waste dischargers. Water Air Soil Pollution 225, Article#1892.

Cho JH, Sung KS, Ha SR (2004) A river water quality management model for optimizing regional wastewater treatment cost using a genetic algorithm. Journal of Environmental Management 73(3):229–242.

de Melo JJ, Camara AS (1994) Models for the optimization of regional wastewater treatment systems. European Journal of Operational Research 73(1):1-16.

Eheart JW, Park H (1989) Effects of temperature variation on critical stream dissolved oxygen. Water Resources Research 25(2):145-151.

Eheart JW, Brill ED, Liebman JC (1990) Discharger grouping for water quality control. Journal of Water Resources Planning and Management 116(1):21-37.

Ellis JH (1987) Stochastic water quality optimization using embedded chance constraints. Water Resources Research 23(12):2227-2338.

Fujiwara O, Gnanendran SK, Ohgaki S (1986) River quality management under stochastic stream flow. Journal of Environmental Engineering 112(2):185–1986.

Ghosh S, Mujumdar PP (2006) Risk minimization in water quality control problems of a river system. Advances in Water Resources 29:458–470.

Ghosh S, Mujumdar P (2010) Fuzzy waste load allocation model: A multiobjective approach. Journal of Hydroinformatics 12:83-96.

Han K, Noh J, Kim JS, Lee C (2012) Application of stochastic optimization algorithm for waste load allocation in the Nakdong River basin, Korea. KSCE Journal of Civil Engineering 16:650-659.

Herbay JP, Smeers Y, Tyteca D (1983) Water quality management with time varying river flow and discharger control. Water Resources Research 19(6):1481-1487.

Karmakar S, Mujumdar PP (2006a) Grey fuzzy optimization model for water quality management of a river system, Advances in Water Resources 29:1088–1105.

Karmakar S, Mujumdar PP (2006b) An inexact optimization approach for river water quality management. Journal of Environmental Management 81:233–248.

www.SID.ir

Archive of SID

Saadatpour M, Afshar A (2007) Waste load allocation modeling with fuzzy goals; simulation-optimization approach. Water Resources Management 21:1207–1224

Sasikumar K, Mujumdar PP (1998) Fuzzy optimization model for water quality management of a river system. Journal of Water Resources Planning and Management 124(2):79-88.

Streeter HW, Phelps EB (1925) A study of the pollution and natural purification of the Ohio River. U.S. Public Health Bulletin 146.

Sasikumar K, Mujumdar PP (2000) Application of fuzzy probability in water quality management of a river system. International Journal of Systems Science 31(5):575–591.

Takyi AK, Lence BJ (1995) Markov chain model for seasonal water quality management. Journal of Water Resources Planning and Management 121(2):144-157.

Takyi AK, Lence BJ (1999) Surface water quality management using a multiple-realization chance constraint method. Water Resources Research 35(5):1657-1670.

Tavakoli A, Kerachian R, Nikoo MR, Soltani M, Malakpour-Estalaki S (2014) Water and waste load allocation in rivers with emphasis on agricultural return flows: application of fractional factorial analysis. Environmental Monitoring and Assessment 186(9):5935-49.

Tavakoli A, Nikoo MR, Kerachian R, Soltani M (2015) River water quality management considering agricultural return flows: application of a non-linear two-stage stochastic fuzzy programming. Environmental Monitoring and Assessment 187(4), Article#158.

Vasquez JA, Maier HR, Lence BJ, Tolson BA, Foschi RO (2000) Achieving water quality system reliability using genetic algorithm. Journal of Environmental Engineering 126:954-962.

Vemula SVR, Mujumdar PP, Ghosh S (2004) Risk evaluation in water quality management of a river system. Journal of Water Resources Planning and Management 130(5):411–423.

Warwich JJ, Roberts LA (1992) Computing the risk associated with waste load allocation modeling. Journal of the American Water Resources Association 28:903-915.

Xie YL, Li YP, Huang GH, Li YF, Chen LR (2011) An inexact chance-constrained programming model for water quality management in Binhai New Area of Tianjin, China. Science of the total environment 409(10):1757-1773.

Mostafavi SA, Afshar A (2011) Waste load allocation using non-dominated archiving multi-colony ant algorithm Procedia. Computer Science 3:64–69.

Mujumdar P. P. and Sasikumar K. (2002) A fuzzy risk approach for seasonal water quality management of a river system. Water Resources Research 38(1), Article#1004.

Mujumdar PP, Vemula SVR (2004) Fuzzy waste load allocation model: simulation-optimization approach. Journal of Computing in Civil Engineering 18(2):120-131.

Nikoo MR, Kerachian R, Karimi A (2012a) A nonlinear interval model for water and waste load allocation in river basins. Water Resources Management 26:2911-2926.

Nikoo MR, Kerachian R, Niksokhan MH (2012b) Equitable waste load allocation in rivers using fuzzy Bi-matrix games. Water Resources Management 26:4539-4552.

Nikoo MR, Kerachian R, Karimi A, Azadnia AA (2013) Optimal water and waste-load allocations in rivers using a fuzzy transformation technique: a case study. Environmental Monitoring and Assessment 185:2483-2502.

Nikoo MR, Kerachian R, Karimi A, Azadnia AA, Jafarzadegan K (2014) Optimal water and waste load allocation in reservoir–river systems: a case study. Environmental Earth Sciences 71(9):4127-4142.

O'Connor D, Dobbins WE, (1958) Mechanism of reaeration in natural streams. Transactions 123:641–684.

Qin X, Huang G, Chen B, Zhang B (2009) An interval-parameter waste-load-allocation model for river water quality management under uncertainty. Environmental Management 43:999–1012.

Qin X, Huang GH, Zeng GM, Chakma A, Huang Y (2007) An interval-parameter fuzzy nonlinear optimization model for stream water quality management under uncertainty. European Journal of Operational Research 180, 1331-1357.

ReVelle C, Loucks DP, Lynn WR (1968) Linear Programming Applied to Water Quality Management. Water Resources Research 4(1):1-9.

Rehana S, Mujumdar P (2009) An imprecise fuzzy risk approach for water quality management of a river system. Journal of Environmental Management 90:3653-3664.

Rossman LA (1989) Risk equivalent seasonal waste load allocation. Water Resources Research 25(10):2083-2091.

www.SID.ir

Archive of SID

input information uncertainty. Environmental Management 55(3):199-217.

Zhu H, Huang GH, Guo·P, Qin XS (2009) A fuzzy robust nonlinear programming model for stream water quality management. Water Resources Management 23:2913–2940.

Zou R, Liu Y, Riverson J, Parker A, Carter S (2010) A nonlinearity interval mapping scheme for efficient waste load allocation simulation-Optimization analysis. Water Resources Research 46(8):1-14.

Yandamuri SRM, Srinivasan K, Bhallamudi SM (2006) Multiobjective optimal waste load allocation models for rivers using nondominated sorting genetic algorithm-II. Journal of Water Resources Planning and Management 132(3):133–143.

Yang CC, Chen CS, Lee CS (2011) Comprehensive river water quality management by simulation and optimization models. Environmental Modeling and Assessment 16(3):283-294.

Yulianti JS, Lence BJ, Johnson GV, Takyi AK (1999) Non-point source water quality management under

www.SID.ir