



Review Paper

Dealing with Uncertainty in Water Systems
ManagementB. Deylami¹, H. Mianabadi^{2*}, and A. Ghorbani³

Abstract

Managing water systems in a dynamic and highly uncertain environment has become a challenge. Multiple uncertainties have made the management of these systems a relatively difficult task. Technical approaches on their own, do not have the ability to address deep uncertainties in the management of water systems. Deep uncertainty cannot be easily remedied because it is related to high levels of governance and policy-making. In other words, decision makers have little theoretical consensus on the various components of the system. This reveals the necessity of adopting approaches which are capable of taking various types of uncertainties. The purpose of this paper is to explain and analyze the four approaches of resilience, robustness, flexibility, and adaptation in dealing with and managing deep uncertainties and to investigate their application in coupled human-natural water systems. In this article, using the descriptive-comparative method and literature review, the characteristics of the mentioned approaches have been collected and compared with each other. Finally, it was concluded that the adaptation approach, compared to other approaches, has a better ability to be used in water systems governance and management. This does not mean that other approaches are not effective in the management of such systems and, due to their inherent attributes, they can be used in the management of various parts of water systems.

Keywords: Uncertainty, Resilience, Robustness, Flexibility, Adaptation.

Received: July 17, 2021

Accepted: October 24, 2021

مقاله مروری

مواجهه با عدم قطعیت در مدیریت سیستم‌های آبی

به‌هاور دیلمی^۱، حجت میان‌آبادی^{۲*} و امینه قربانی^۳

چکیده

مدیریت سیستم‌های آبی در محیطی پویا و دارای عدم قطعیت بالا به امری چالش‌برانگیز تبدیل شده است. عدم قطعیت‌های متعدد این سیستم‌ها، سیاست‌گذاری، مدیریت و برنامه‌ریزی صحیح آن‌ها را به امری دشوار تبدیل کرده است. رویکردهای فنی به تنهایی توانایی لحاظ کردن عدم قطعیت‌های عمیق در مدیریت سیستم‌های آبی را دارا نیستند. عدم قطعیت عمیق، به سادگی قابل مرتفع کردن نیست؛ زیرا مربوط به سطوح بالای حکمرانی و سیاست‌گذاری است و به عبارت دیگر افراد مسئول، اجماع نظری کمی بر روی مؤلفه‌های مختلف سیستم دارند. بر این اساس در مدیریت سیستم‌های آبی ضروری است رویکردی اتخاذ شود که توانایی در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های مختلف را داشته باشد. هدف از این مقاله، تبیین و تحلیل چهار رویکرد تاب‌آوری، استواری، انعطاف‌پذیری و سازگاری در مواجهه و مدیریت عدم قطعیت‌های عمیق و بررسی کاربرد آن‌ها در سیستم‌های درهم‌تنیده آبی است. در این مقاله با استفاده از روش توصیفی- تطبیقی و با جمع‌آوری اطلاعات از منابع کتابخانه‌ای به گردآوری ویژگی‌های رویکردهای مذکور و مقایسه آن‌ها با یکدیگر پرداخته شده است. نتایج حاکی از آن بود که رویکرد سازگاری در مقایسه با سایر رویکردها، توانایی مناسب‌تری برای استفاده در حکمرانی و مدیریت سیستم‌های آبی با هدف تطبیق یافتن خودجوش با تغییرات و همچنین توانایی حفظ مسیر اصلی سیستم را دارا است. همچنین، باید به این نکته توجه داشت که نتایج کسب شده به معنای این نیست که سایر رویکردها در مدیریت سیستم‌های آبی کارایی ندارند. سایر رویکردها نیز با توجه به ویژگی‌های ذاتی آن‌ها می‌توانند در مدیریت بخش‌های مختلف سیستم‌های آبی بکار گرفته شوند.

کلمات کلیدی: عدم قطعیت، تاب‌آوری، استواری، انعطاف‌پذیری، سازگاری.

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۴/۲۶

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۸/۲

1- M.Sc. Graduate, Department of Water Resources Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran. Email: behavardeylami@modares.ac.ir

2- Assistant Professor, Department of Water Engineering and Management, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran. Email: hmianabadi@modares.ac.ir

3- Assistant Professor, Faculty of Technology, Policy and Management, Delft University of Technology, Delft, The Netherlands.

Email: A.Ghorbani@tudelft.nl

*- Corresponding Author

Dor: [20.1001.1.17352347.1400.17.3.22.7](https://doi.org/10.1001.1.17352347.1400.17.3.22.7)

۱- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد مهندسی منابع آب، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.

۲- استادیار گروه مهندسی و مدیریت آب، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.

۳- استادیار مهندسی سیستم و خدمات، دانشگاه صنعتی دلفت، دلفت، هلند.

*- نویسنده مسئول

بحث و مناظره (Discussion) در مورد این مقاله تا پایان زمستان ۱۴۰۰ امکانپذیر است.



۱- مقدمه

رویکردهای متداول برای مدیریت عدم قطعیت سیستم‌های آبی به صورت عمده به رویکردهای فنی و مهندسی محدود شده‌اند که برای مواجهه با عدم قطعیت‌های آماری بکار گرفته می‌شوند؛ اما این رویکردها به تنهایی نمی‌توانند نیازهای آینده‌ای تحت عدم قطعیت را برطرف کنند (Hallegatte et al., 2012; Lempert et al., 2003; Reed and Kasprzyk, 2009). دلیل این ضعف آن است که محیط سیستم‌های فنی به‌عنوان دنیایی منظم، عقلانی و فیزیکی درک می‌شود که توانایی مهندسی، کنترل و مدیریت شدن را دارد (Merchant, 2015). همچنین، کنترل سیستم با استفاده از رویکرد فنی، نیاز به اطلاعات کافی و وجود یک مدل دقیق از سیستم کنترل شده و محیط آن دارد (Demirel et al., 2013; De Leeuw, 2015; van Riel et al., 1976; De Ridder, 1994). این در حالی است که در سیستم‌های آبی به دلیل درهم‌تنیدگی، اطلاعات کامل و شفاف از آن‌ها در دسترس نیست (Islam and Susskind, 2018). لذا رویکردهای فنی به دلیل عدم توانایی مناسب در لحاظ کردن عدم قطعیت عمیق، برای مواجهه و مدیریت سیستم‌های آبی ناکارآمد هستند.

عدم پاسخگویی رویکردهای صرفاً فنی در مواجهه با سیستم‌های درهم‌تنیده آبی و عدم قطعیت‌های موجود در آن‌ها، لزوم اتخاذ رویکردهای مناسب با درهم‌تنیدگی این سیستم‌ها را آشکار می‌سازد. در راستای اتخاذ رویکرد مناسب برای مدیریت سیستم‌های آبی، امروزه از رویکردهای نوین متعددی همچون تاب‌آوری^۶، استواری^۷، انعطاف‌پذیری^۸ و سازگاری^۹ استفاده می‌شود. این رویکردها، در حال حاضر متداول‌ترین رویکردهای مورد استفاده در مدیریت و برنامه‌ریزی سیستم‌های آبی محسوب می‌شوند. یک دلیل اصلی مطلوبیت این رویکردها توانایی آن‌ها در مواجهه با عدم قطعیت‌های عمیق سیستم‌های درهم‌تنیده و همچنین سیستم‌های آبی است.

هر یک از رویکردهای مذکور در مطالعات مختلف کاربرد گسترده و متفاوتی داشته‌اند. برای مثال، از رویکرد تاب‌آوری در مواردی مانند تغییر اقلیم (Kumar et al., 2021; Mengistu et al., 2021) و در زمینه مدیریت سیلاب (Mehryar and Surminski, 2021; Norizan et al., 2021; Sen et al., 2021) استفاده شده است. از موارد استفاده رویکرد استواری نیز می‌توان به مواردی مانند سازگاری با تغییر اقلیم (Mandal et al., 2021; Pradhanang and Jahan, 2021) و مدیریت سیل (Reynolds et al., 2020; Zhang and Alipour, 2020) و بهینه‌سازی کامپیوتری برای جستجوی مسیرهای سیاست سازگار پویا استوار (Kwakkel et al., 2015) اشاره کرد. از

ضعف در مدیریت منابع آبی را می‌توان به‌عنوان ریشه اغلب مسائل آبی شناخت (Biswas and Tortajada, 2011; Foltz, 2002; Larijani, 2005; Madani, 2014; Sivakumar, 2011). در مدیریت سیستم‌های آبی باید به طیف وسیعی از مسائل درهم‌تنیده آبی از جمله سیل، خشکسالی، حفظ تنوع زیستی و مناقشه‌ها رسیدگی شود که باورها، رویکردها و ارزش‌های انسانی در آن‌ها نقش تعیین‌کننده‌ای را ایفا می‌کنند (Timmerman et al., 2008). این طیف وسیع مسائل، ناشی از آن است که سیستم‌های آبی شامل شبکه‌های به هم پیوسته، نوظهور^۱ و درهم‌تنیده^۲ هستند که رفتارهای غیرخطی، پویا و تطورگرا^۳ دارند و در چندین حوزه (به‌عنوان مثال طبیعی، سیاسی و اجتماعی)، در مقیاس‌های مختلف (به‌عنوان مثال مکانی، زمانی و نهادی) و در چندین سطح (به‌عنوان مثال محلی، ملی و بین‌المللی) فعالیت می‌کنند (Islam and Susskind, 2018, 2012; Liu et al., 2007; Wagener et al., 2010). به بیان ساده، تغییرپذیری^۴ یکی از ویژگی‌های ذاتی سیستم‌های درهم‌تنیده آبی است و مصداق تغییرپذیری سیستم‌های آبی آن است که در پیش‌بینی آن‌ها عدم قطعیت وجود دارد.

به‌صورت کلی عدم قطعیت‌ها به دو دسته آماری و عمیق^۵ تقسیم می‌شوند (Walker et al., 2010). عدم قطعیت‌های آماری با گردآوری داده تقریباً به‌صورت کامل قابل مرتفع کردن است. عدم قطعیت عمیق به سادگی قابل مرتفع کردن نیست؛ زیرا مربوط به سطوح بالای حکمرانی و سیاست‌گذاری است و افراد مسئول، اجماع نظری کمی بر روی مؤلفه‌های مختلف سیستم دارند. بنابراین، ضروری است در کنار توجه به عدم قطعیت به نوع عدم قطعیت نیز توجه شود.

یکی از اصول مدیریت سیستم‌های آبی، مواجهه صحیح با عدم قطعیت، تغییرات مداوم و همچنین تعاملات غیرخطی بین مؤلفه‌های مختلف سیستم است؛ زیرا عدم مواجهه صحیح با عدم قطعیت می‌تواند باعث رقم خوردن نتایج متفاوتی برای سیستم شود (Allen, 2001). نادیده گرفتن عدم قطعیت می‌تواند منجر به عدم توانایی استفاده از فرصت‌های آینده یا عدم توانایی در انجام اقدام‌های اصلاحی به‌منظور جلوگیری از موقعیت‌های نامطلوب شود (Walker et al., 2013). به عبارت دیگر، تصمیمات مؤثر باید با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های غیرقابل حذف اتخاذ شوند (Dessai et al., 2009; Lempert et al., 2003). لذا ضروری است که رویکردهایی در مدیریت این سیستم‌ها بکار گرفته شوند که توانایی در نظر گرفتن عدم قطعیت را داشته باشند.

۲- عدم قطعیت

به طور کلی، عدم قطعیت را می‌توان به عنوان دانش محدود در مورد آینده، گذشته یا وقایع جاری تعریف کرد (Walker et al., 2013). Walker et al. (2013) اشاره کردند که در طراحی طرح‌های پایدار به سه دلیل ضروری است که عدم قطعیت قبول، درک و مدیریت شود: (۱) تمامی عدم قطعیت‌های آینده، قابل حذف نیستند، (۲) نادیده گرفتن عدم قطعیت‌ها باعث ایجاد محدودیت در توانایی سیستم برای انجام اقدام‌های اصلاحی در آینده می‌شود و سیستم را در موقعیت‌های نامناسبی قرار می‌دهد که می‌توان از وقوع آن‌ها جلوگیری کرد و (۳) نادیده گرفتن عدم قطعیت‌ها باعث به وجود آمدن طرح‌های ناپایدار، از دست دادن فرصت‌ها و استفاده ناکارآمد از منابع می‌شود.

عدم قطعیت‌ها خود به دو دسته آماری و عمیق تقسیم می‌شوند. مسائل ساده و پیچیده آبی اغلب با عدم قطعیت‌های آماری همراه هستند؛ عدم قطعیت آماری ناشی از نبود یا کمبود داده است و لذا چنین عدم قطعیت‌هایی را می‌توان با اتخاذ رویکردهای شبیه‌سازی و رویکردها ریشه در دیدگاه بخشی‌نگری^{۱۰} دارند، در مورد مسائل درهم‌تنیده آبی می‌توانند نتایج نادرستی را به همراه داشته باشند. از سویی دیگر، اغلب عدم قطعیت‌های موجود در مسائل درهم‌تنیده آبی، از نوع عدم قطعیت‌های عمیق هستند. عدم قطعیت عمیق بدین معنی است که ذی‌نفعان بر روی سیستم و مرزهای آن، خروجی‌های موردعلاقه و اهمیت نسبی آن‌ها و توزیع احتمالاتی برای ورودی‌های سیستم توافق ندارند (Lempert et al., 2003; Walker et al., 2013). به‌عنوان مثال، تعاملات کشاورزان با سیاستگذاران و با یکدیگر و سیستم‌های منابع آب و پیش‌بینی مؤلفه‌های اقلیمی حاصل از اندرکنش‌های درهم‌تنیده انسانی- طبیعی در گروه عدم قطعیت‌های عمیق جا دارند. بر این اساس، با توجه به اینکه رویکردهای مورد استفاده برای مواجهه به عدم قطعیت آماری برای سطوح حکمرانی و سیاست‌گذاری، ناکافی هستند، ضروری است رویکردهایی برای مدیریت سیستم‌های آبی اتخاذ شوند که توانایی در نظر گرفتن عدم قطعیت عمیق را داشته باشند. با توجه به مطالب بیان‌شده در ادامه به تشریح چهار رویکرد مواجهه با عدم قطعیت عمیق پرداخته شده است. در جدول ۱ سطوح مختلف عدم قطعیت بر اساس جنبه‌های مختلف تصمیم‌گیری ارائه شده است.

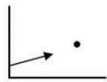
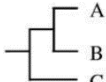
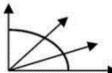
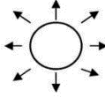
موارد استفاده شده از رویکرد انعطاف‌پذیری می‌توان به موارد زیر اشاره کرد: مواجهه با وقایع حدی اقلیمی در ادبیات سازگاری (Hanak, 2011)، تغییرات اقلیمی (Martens et al., 2021) و ارزیابی اقدام‌های مدیریتی پیشنهادی برای مدیریت ریسک سیل (Difrancesco and Tullos, 2015). در رابطه با استفاده از رویکرد سازگاری در زمینه مباحث آبی نیز می‌توان به مواردی چون تغییر اقلیم (Chen and Gong, 2021; Pundt et al., 2021)، سازگاری با آسیب‌پذیری ناشی از سیل (Ullah et al., 2021) و ارزیابی ریسک سیل (Pham et al., 2021) اشاره کرد.

یک چالش جدی در مدیریت و برنامه‌ریزی و مواجهه با مسائل سیستم‌های درهم‌تنیده آبی آن است که رویکردهای مناسب برای مواجهه با عدم قطعیت عمیق در این سیستم‌ها، در مواردی بسیار مشابه و در بعضی موارد بجای یکدیگر بکار گرفته می‌شوند. به عنوان مثال، تمامی این رویکردها در زمینه مواجهه با تغییر اقلیم و همچنین مواجهه با سیلاب بکار گرفته شده‌اند. در همین راستا با توجه به ویژگی‌های متفاوت هر رویکرد، می‌توان انتظار عملکردها و نتایج متفاوت در زمینه‌های مختلف را داشت. بر این اساس عدم آشنایی و همچنین عدم بررسی جامع رویکردهای مذکور قبل از اتخاذ و اعمال آن‌ها، علاوه بر اینکه نمی‌تواند منجر به مواجهه صحیح با عدم قطعیت‌های موجود در سیستم‌های آبی شود، بلکه می‌تواند مسائل جدید و نوظهوری را در این سیستم‌ها ایجاد کند. لذا در مدیریت سیستم‌های آبی باید به این سؤال پاسخ داد که هر یک از رویکردهای استفاده شده در مدیریت عدم قطعیت عمیق سیستم‌های آبی چه ویژگی‌هایی دارند؟ نقاط ضعف و محدودیت این رویکردها برای کاربرد در سیستم‌های آبی کدام هستند؟ آیا تمامی رویکردهای مواجهه با عدم قطعیت عمیق نتایج مناسبی را برای سیستم‌های آبی در پی خواهند داشت؟

با توجه به مطالب فوق، هدف از این مقاله، تبیین، بررسی کاربرد و مقایسه چهار رویکرد مواجهه با عدم قطعیت‌های عمیق در سیستم‌های درهم‌تنیده آبی شامل تاب‌آوری، استواری، انعطاف‌پذیری و سازگاری است. برای نیل به هدف مذکور از روش توصیفی- تطبیقی و به‌منظور جمع‌آوری اطلاعات نیز از منابع کتابخانه‌ای استفاده شده است. با توجه به هدف فوق در ادامه به شرح مختصر عدم قطعیت و سپس به تحلیل و واکاوی ویژگی‌های هر رویکرد و تطابق آن با سیستم‌های آبی پرداخته شده است. در پایان نیز بدین موضوع پرداخته شده است که کدام یک از رویکردهای مذکور، ویژگی‌های مناسب‌تری را در مقایسه با دیگر رویکردها برای مدیریت سیستم‌های آبی جهت مواجهه با عدم قطعیت عمیق دارد.

Table 1- The progressive transition of levels of uncertainty from determinism to total ignorance (Walker et al., 2010)

جدول ۱- انتقال تدریجی سطوح عدم قطعیت از آگاهی کامل به جهل کامل (Walker et al., 2010)

		Level 1	Level 2	Level 3	Level 4		
		Statistical uncertainty		Deep Uncertainty			
Determinism	Context	A clear enough future 	Alternate futures (with probabilities) 	A multiplicity of plausible futures 	Unknown future 	Total Ignorance	
	System model	A single system model	A single system model with a probabilistic parameterization	Several system models, with different structures	Unknown system model; know we don't know		
	System outcomes	A point estimate and confidence interval for each outcome	Several sets of point estimates and confidence intervals for the outcomes, with a probability attached to each set	A known range of outcomes	Unknown outcomes; know we don't know		
	Weights on outcomes	A single estimate of the weights	Several sets of weights, with a probability attached to each set	A known range of weights	Unknown weights; know we don't know		

مدیریت وقایع حدی در این سیستم‌ها است. تاب‌آوری به صورت ساده به معنای ادامه حیات سیستم پس از وارد شدن تغییرات ناگهانی، شدید و سخت به سیستم و بازگشت به شرایط اولیه خود است. در جدول ۲ تعدادی از تعاریف مربوط به تاب‌آوری ارائه و در ادامه به تشریح بیشتر این رویکرد پرداخته شده است.

۳- تاب‌آوری

یکی از رویکردهای مدیریت عدم قطعیت‌های عمیق در مدیریت سیستم‌ها، رویکرد تاب‌آوری است. این رویکرد در مدیریت سیستم‌های آبی نیز کاربرد فراوانی دارد. کاربرد ویژه این رویکرد در مسائل آبی،

Table 2- Different definitions for resilience concept

جدول ۲- تعاریف مختلف ارائه شده برای مفهوم تاب‌آوری

Definition	Reference
The term resilience was first used by physicists to describe spring's properties and explain the stability of materials and their resistance to external shocks	(Davoudi et al., 2012)
The ability of a system to absorb change and disturbance while maintaining similar relationships between state variables	(Holling, 1973)
The capacity of a system to absorb turbulence and reorganize so that the same function, structure, feedback, and consequently the identity of the system is maintained	(Folke, 2016)
It is a resilient system that is often able to absorb disturbances while maintaining its current identity and stability	(Van Der Brugge et al., 2005; Gersonius 2012; Walker et al., 2004)
Resilience is building the capacity for continued development in the face of incremental, expected or surprising change.	(Folke, 2006)
Resilience thinking is about the interaction of gradual and sudden changes in slow and fast variables in interconnected systems and how it works in uncertain, surprising, and often unpredictable ways	(Carpenter et al., 2009; Holling and Gunderson, 2002)
System resilience is the level of tolerance for change by the system, provided that the past performance and structure of the system are maintained and development options are provided	(Carpenter et al., 2001; Walker et al., 2002)
System resilience is the level of tolerance for change by the system, provided that the past performance and structure of the system are maintained and development options are provided	(Holling, 1973)

عملکرد رویکرد تاب‌آوری بر مبنای نظریه سیستم‌های درهم‌تنیده است. بر این اساس و در راستای حصول دیدگاهی جامع‌نگر^{۱۱}، این رویکرد سعی در بهره‌بردن و اتصال علوم مختلف در مدیریت اکوسیستم دارد (Berkes et al., 2008). به بیان دیگر، رویکرد تاب‌آوری بر این نکته تأکید دارد که سیستم‌های اجتماعی و اکولوژیکی نمی‌توانند به‌تنهایی و جدا از هم در نظر گرفته شوند، بلکه باید به‌عنوان سیستم‌های مرتبط و جفت‌شده شناخته و تحلیل شوند (Nelson et al., 2007). بر این اساس، رویکرد تاب‌آوری به این موضوع اشاره دارد که همواره سیستم در حال تغییر است و علاوه بر پذیرفتن تغییر سیستم، باید به‌عنوان سیستم‌های مرتبط و جفت‌شده به سیستم‌های آبی نگاه شود که با فراهم آوردن ظرفیت به مواجهه با اتفاقات ناگوار کمک می‌کند. تاب‌آوری جامعه از مجموعه‌ای شامل: (۱) ظرفیت سازگاری به‌معنای توسعه اقتصادی جهت کمک به بهبودی پس از قرار گرفتن در معرض خطرات، (۲) سرمایه اجتماعی^{۱۲}، (۳) اطلاعات و ارتباطات و (۴) شایستگی جامعه^{۱۳} پدید می‌آید و بطور کلی آن‌ها به فراهم آوردن ظرفیت جامعه برای مقابله با تغییرات مانند فاجعه‌ها کمک می‌کنند (Norris et al., 2008). لذا برای اتخاذ رویکرد تاب‌آوری در مباحث آبی نیاز است که مؤلفه‌های انسانی سیستم‌های آبی مانند سرمایه اجتماعی، شایستگی جامعه و چنین مؤلفه‌هایی تقویت شوند. با توجه به این موارد، یکی از اقدام‌های اصلی در سیاست‌گذاری‌های آبی با استفاده از رویکرد تاب‌آوری را می‌توان توسعه آموزش در راستای تقویت مؤلفه‌های انسانی سیستم‌های آبی دانست. اتخاذ این رویکرد در سیاست‌های آبی از منظر اینکه نگاهی جامع به مسائل دارد و باعث می‌شود که ذی‌مدخلان مختلف در اتخاذ سیاست و برنامه‌ها مشارکت داشته باشند، بسیار مثمر است.

۳-۱- معایب و محدودیت‌های رویکرد تاب‌آوری

کاربرد متداول رویکرد تاب‌آوری برای مواجهه با وقایع حدی مانند سیل و خشکسالی است که در سیاست‌های آبی بسیار می‌تواند کاربرد داشته باشد. وقایع حدی در سیستم‌های آبی همواره رخ می‌دهند و لذا اتخاذ رویکرد مناسب جهت مدیریت این وقایع همیشه حائز اهمیت است. همچنین، Folke et al. (2010) اشاره می‌کند که نمی‌توان تاب‌آوری تنها بخشی از سیستم را تقویت کرد. این بدین معنا است که اگر سیستم نسبت به نوع خاصی از وقایع مقاوم شود، لزوماً نسبت به انواع دیگری از وقایع نادر مقاوم نخواهد بود (Anderies, 2015; Folke et al., 2010).

یکی دیگر از معایب رویکرد تاب‌آوری، عدم توانایی شناخت محل آستانه‌های تحمل سیستم است. همانطور که پیش‌تر ذکر شد،

تاب‌آوری درجه مقاومت در برابر تکانه‌های خارجی است و میزان مقاومت سیستم در برابر تکانه‌ها، به آستانه‌های تحمل سیستم که عملاً مرزهای اطراف سیستم را تشکیل می‌دهند، بستگی دارد (Berkes et al., 2008). لذا برای افزایش تاب‌آوری سیستم، ضروری است که آستانه‌های تحمل سیستم^{۱۴} توسعه پیدا کنند. آستانه‌های تحمل سیستم‌های آبی به‌وسیله ویژگی‌های اقلیمی، ذی‌مدخلان، مردم آن منطقه و سرمایه اجتماعی و دیگر متغیرهای دخیل در آن حوضه تعریف می‌شوند؛ اما به دلیل وجود بازخوردهای غیرخطی در این مسائل، شناسایی محل دقیق آستانه‌ها بسیار مشکل است (Nelson et al., 2007). از این‌رو، رویکرد تاب‌آوری در زمینه مباحث آبی عملکرد مناسبی ندارد.

دستیابی به تاب‌آوری از طریق اقدام‌های کاهش^{۱۵} و سازگاری مستقل در مقابل وقایع حدی، مستلزم تحریک جامعه و ترویج اهمیت و ضرورت آب است (Madani, 2019). این امر می‌تواند از طریق آموزش، افزایش آگاهی، تعامل نزدیک با جامعه و تعامل شهروندان انجام شود (Hjorth and Madani, 2014). از این‌رو، سرمایه‌گذاری بر روی رویکرد تاب‌آوری نیازمند آموزش است و در نتیجه نیازمند اقدام‌های بلندمدت است و ممکن است که در کوتاه‌مدت نتایج آن قابل ملاحظه نباشد. در مسائل آبی به دلیل اینکه در کنار اقدام‌های بلندمدت به اقدام‌های کوتاه‌مدت نیز نیاز است، رویکرد تاب‌آوری به تنهایی ممکن است که کارایی مناسبی نداشته باشد. به عنوان مثال در این زمینه می‌توان به تغییر اقلیم اشاره کرد که هم نیازمند اقدام‌های بلندمدت جهت تطبیق یافتن با شرایط سیستم است و هم نیازمند تطبیق یافتن کوتاه‌مدت با شرایط است؛ زیرا تغییر اقلیم هم‌اکنون نیز رخ داده است و نیازمند تطبیق با شرایط سیستم است.

۴- استواری

استواری ویژگی تصمیم، استراتژی یا سیاستی است که انتظار می‌رود عملکرد مقایسه‌ای بهتری در مقابل تعداد زیادی سناریو داشته باشد (Anvarifar, 2017). از گذشته رویکرد استواری در تدوین و اتخاذ راهبردها، سیاست‌ها، تصمیم‌گیری‌ها و دیگر سطوح مدیریتی و حکمرانی کاربرد زیادی داشته است. این رویکرد به مرور زمان توسعه یافته و در حال حاضر با عنوان «تصمیم‌گیری و سیاست استوار» کاربردهای متعددی دارد (Hashimoto et al., 1982; Matalas, 1977; Thissen and Walker, 2013). به‌طور ساده، کارکرد رویکرد استواری بدین صورت است که متناسب با طیف تغییرات احتمالی سناریوهایی تدوین می‌شوند و با توجه به محتمل‌ترین

- **سازگاری:** شناسایی اقدام‌های تأمینی؛ اصلاح سیاست‌های موجود یا تعریف سیاست‌های جدید برای پرداختن به این آسیب‌پذیری‌ها. تکرار گام‌های دو و سه برای سیاست‌های کاندیدای دیگر؛
 - **نمایش:** رسم خروجی‌های مورد انتظار سیاست‌ها تحت سناریوهای آسیب‌پذیری و انتخاب استوارترین آن‌ها برای پیاده‌سازی.
- به صورت مرسوم، رویکرد استواری به صورت یک چارچوب تحلیلی تصمیم‌گیری تکراری مبتنی بر کامپیوتر در شناسایی راهبردهای مناسب مورد استفاده قرار می‌گیرد؛ به‌عنوان مثال راهبردی که در طیف تغییرات احتمالی، حداقل حساسیت را داشته باشد (Lempert and Schlesinger, 2000; Ullman, 2001). در همین راستا، Prutsch et al. (2010) از این رویکرد برای طراحی سیستم جمع‌آوری آب شهری استفاده کردند که توانایی حفظ کارایی در طیف وسیعی از بارش‌ها را دارد. اما نقطه ضعف این رویکرد آن است که توانایی در نظر گرفتن وقایع نوظهور یا وقایع شدیدتر از سناریو محتمل را ندارد و به‌عنوان مثال در صورت رخداد بارش بیشتر از میزان سناریو محتمل، احتمال آسیب دیدن سیستم وجود دارد.
- استواری این امکان را برای سیستم فراهم می‌کند تا بتواند مجموعه‌ای از الزامات ثابت را برآورده کرده و برای مدت‌زمان مشخص عملکرد موردنظر خود را علی‌رغم تغییر در محیط یا درون سیستم حفظ کند (Goulter et al., 1992; Saleh et al., 2003). از کاربردهای این رویکرد می‌توان به پژوهش (Groves and Lempert, 2007) اشاره کرد که از رویکرد تصمیم‌گیری استوار برای شناسایی راهبردهای استوار در طیف گسترده‌ای از عدم قطعیت‌های اغلب ضعیف^{۱۸} استفاده کردند.

سناریو پیش‌بینی شده، رویکرد استواری تدوین می‌شود. در جدول ۳ تعدادی از تعاریف ارائه شده برای این رویکرد گردآوری شده است.

چارچوب تصمیم‌گیری استوار از دیدگاه‌های مختلف در مورد آینده برای حمایت کامل از نتایج مدل‌سازی استفاده می‌کند و هدف آن کمک به شناسایی یک برنامه ایستا است که پنج ویژگی را دارا است (Groves and Lempert, 2007; Lempert et al., 2003; Walker et al., 2013). این پنج ویژگی عبارتند از: (۱) به اندازه کافی در گستره وسیعی از آینده‌های محتمل عملکرد خوبی دارد؛ (۲) از اغلب مواردی که سیستم در آن شرایط در رسیدن به اهداف خود ناموفق خواهد بود، اجتناب می‌کند؛ (۳) باقی آسیب‌پذیری‌های برنامه را روشن می‌سازد؛ (۴) توانایی دخیل کردن نظام‌مند اطلاعات احتمالی و غیردقیق را دارد و (۵) توانایی ترکیب انواع مختلفی از اطلاعات نامشخص را دارد.

مراحل تصمیم‌گیری استوار را می‌توان در پنج مرحله دسته‌بندی کرد (Hall et al., 2012; Keefe, 2012):

- **دامنه‌بندی^{۱۶}:** تعیین دامنه تجزیه و تحلیل با شناسایی عدم قطعیت‌های خارجی^{۱۷}، گزینه‌های سیاستی، روابط کلیدی و معیارهای عملکرد؛ همچنین ساخت یک مدل شبیه‌سازی که اقدام‌ها را به عواقب‌شان مرتبط می‌سازد.
- **شبیه‌سازی:** شناسایی یک سیاست مشخص برای ارزیابی و اجرای آن تحت گروهی از سناریوها؛
- **کشف سناریو:** شناسایی آسیب‌پذیری‌های سناریو کاندیدا؛ بدین معنا که چه ترکیبی از عدم قطعیت‌های خارجی و در چه سطحی باعث می‌شوند که سیاست در دستیابی به اهدافش شکست بخورد؛

Table 3- Different definitions for robustness concept

جدول ۳- تعاریف مختلف ارائه شده برای مفهوم استواری

Definition	Reference
Robustness is a state in which the performance of a technology, product, or process has the least sensitivity to disturbances or aging and also the least cost (meaning aging, obsolescence, and wear and tear of system factors such as technical infrastructure).	(Taguchi et al., 2000)
A robust system remains reliable without being affected by significant events such as drought. Without the need to change under different operating conditions, there is no concern about what will happen.	(Fricke and Schulz, 2005; TSUI, 1992)
Despite anticipation and planning, strategies often face situations for which they were not originally designed, and robust strategies will perform reasonably well in such situations.	(Averch, 1990)
A robust system is sensitive to the most likely predicted scenarios.	(Hallegatte et al., 2012)
Under a robust approach, the system may not be able to respond appropriately in the event of more severe events than anticipated.	(McDonald and Styles, 2014)

دلیل بروز وقایع نوظهور کاری سخت یا حتی غیرممکن است. باید توجه داشت که شناسایی تمامی سناریوها زمان زیادی را نیز می‌طلبد و با توجه به ماهیت سیستم‌های آبی، زمان زیادی برای اینکه صرف تدوین سناریوها شود، وجود ندارد.

مبنای رویکرد استواری استفاده از داده‌های تاریخی سیستم و سناریوپردازی است. بر این اساس سیستم بر مبنای محتمل‌ترین سناریو برنامه‌ریزی می‌شود؛ اما باید توجه داشت که به دلیل بروزسانی و در دسترس قرارگرفتن پیوسته اطلاعات، علاوه بر این که پیش‌بینی محتمل‌ترین سناریو، کاری سخت است، احتمال بروز وقایع نوظهور که جزئی اصلی از سیستم‌های آبی هستند نیز در نظر گرفته نمی‌شود و لذا رویکرد استواری از این منظر دارای محدودیت است.

۵- انعطاف‌پذیری

از دیگر رویکردهای مواجهه با عدم قطعیت می‌توان به انعطاف‌پذیری اشاره کرد. به بیان ساده، انعطاف‌پذیری قابلیت از سیستم است که امکان تنظیم شدن سیستم با توجه به نیازهای آینده را فراهم می‌کند. در مدیریت آب تعاریف زیر را برای انعطاف‌پذیری ارائه داده‌اند: امکانات محدود برای ایجاد تغییر بر اساس بینش جدید (Pahl-Wostl, 2007)، توانایی کنار آمدن با عدم قطعیت و توانایی تطبیق با نیازهای جدید (Patel Center, 2011)، توانایی پاسخگویی به عدم قطعیت‌های آینده (Suttinon and Nasu, 2010). در جدول ۴ تعدادی از تعاریف مربوط به انعطاف‌پذیری ارائه شده است.

در رابطه با انعطاف‌پذیری می‌توان به این مثال اشاره کرد که هنگام رخداد واقعه‌ای، نهادها و سازمان‌های ذی‌ربط چه مقدار چابکی در ارتباط با یکدیگر در راستای مواجهه با واقعه دارند. همچنین، می‌توان به اقدام‌های درون یک سازمان برای مواجهه با رخداد یک حادثه نیز اشاره کرد که انجام اقدام‌ها از منظر سهل بودن و سرعت انجام آن‌ها چگونه است و هرچقدر که انجام اقدام‌ها سهل‌تر و سرعت انجام آن‌ها بیشتر باشد، سیستم انعطاف‌پذیری بیشتری دارد.

آن‌ها همچنین ادعا کرده‌اند که تصمیم‌گیری استوار می‌تواند در تعیین راهبردهایی که تصمیم‌گیرندگان با انتخاب‌های مهمی روبه‌رو هستند، کمک‌کننده باشد. در مطالعه دیگری نیز در سال ۲۰۱۵ روش بهینه‌سازی کامپیوتری برای جستجوی مسیره‌های سیاست سازگار پویا استوار^{۱۹} توسعه یافت (Kwakkel et al., 2015). با توجه به این موارد یکی دیگر از نقاط ضعف رویکرد استواری آن است که بر داده‌های گردآوری شده سیستم متکی است و لذا در صورت فقدان یا کمبود داده نمی‌تواند عملکرد مناسبی را از خود بروز دهد.

بررسی ادبیات در زمینه مدیریت منابع آب بیانگر آن است که این رویکرد برای رسیدگی به عدم قطعیت مورد استفاده قرار گرفته است. به عنوان مثال، Kasprzyk et al. (2013) یک رویکرد جستجو تکاملی چند هدفه را با اصول تصمیم‌گیری استوار ترکیب کردند. آن‌ها با استفاده از یک الگوریتم تکاملی، چندین جایگزین برای برنامه‌ریزی را ارزیابی کردند. با این حال، کاربرد بحث استواری در مطالعات آبی، بیشتر بر بهینه‌سازی استوار متمرکز بوده است. برای مثال Nasiri-Gheidari and Marofi (2018) در مورد مسئله تخصیص آب و Ming et al. (2018) در مورد مسئله مشارکت در نیروگاه‌های برقایی از رویکرد بهینه‌سازی استوار بهره بردند. از دیگر کاربردهای رویکرد استواری می‌توان به زمینه‌های تغییر اقلیم (Lempert et al., 1996; Lempert et al., 2003)، مدیریت ریسک سیل (Fischbach, 2010)، افزایش سطح دریا (Lempert et al., 2012) و مدیریت منابع آب (Groves, 2005; Groves and Lempert, 2010; Lempert and Groves, 2007) اشاره کرد.

۴-۱- معایب و محدودیت‌های رویکرد استواری

یکی از معایب رویکرد استواری سناریومحور بودن آن است. به بیان دیگر، ضروری است که تمامی سناریوها برای بکارگیری این رویکرد شناسایی شوند. همچنین، باید توجه داشت که شناسایی سناریوها در مسائل آبی به دلیل تعدد، علاوه بر اینکه هزینه زیادی در پی دارد، به

Table 4- Different definitions for flexibility concept
جدول ۴- تعاریف مختلف ارائه شده برای مفهوم انعطاف‌پذیری

Definition	Reference
Uncommitted potential for change	(Bateson, 1972; Demos, 1969)
The potential of the system to restructure	(Pahl Wostl, 2002)
Ability to change in response to changed conditions	(Adger et al., 2005)
Change of plans, in situations where circumstances change.	(Walker et al., 2013)
One of the capabilities of the system that promotes learning through time and increasing opportunities for reversibility.	(Hallegatte, 2009; Kundzewicz, 1999; Refsgaard et al., 2013)

۵-۱- معایب و محدودیت‌های رویکرد انعطاف‌پذیری

انعطاف‌پذیری بر زیرساخت‌های سیستم که مؤلفه‌های اصلی در مواجهه با عدم قطعیت و رویدادهای نوظهور و تطورگرا هستند، تمرکز ندارد. به بیان دیگر، هدف انعطاف‌پذیری افزایش توانایی تغییر سیستم است (Fricke and Schulz, 2005). بر این اساس، یکی از معایب رویکرد انعطاف‌پذیری را می‌توان عدم در نظر گرفتن وقایع نوظهور و تطورگرا (دو ویژگی اصلی سیستم‌های آبی) دانست. همچنین، باید به این نکته توجه کرد که رویکرد انعطاف‌پذیری لزوماً باعث تقویت سیستم نمی‌شود و بلکه توانایی تغییر سیستم را افزایش می‌دهد.

Fletcher (2018) در رابطه با انعطاف‌پذیری چنین بیان کرده است که انعطاف‌پذیری دستیابی به یک هدف عملکردی نیست بلکه یک استراتژی یا ویژگی سیستم برای دستیابی به اهداف عملکردی دیگر است. به بیان دیگر، این رویکرد می‌تواند مکمل دیگر رویکردها باشد تا اقدام‌های مختلف تسهیل شوند و در اغلب موارد به‌عنوان رویکرد جامع که به تنهایی مورد استفاده قرار بگیرد کاربرد ندارد. به‌عنوان مثال، طراحی انعطاف‌پذیر یک تصفیه‌خانه ممکن است یک استراتژی اولیه با ظرفیت مشخص باشد که در صورت لزوم قابلیت گسترش داشته باشد (Wong, 2013). به عبارت دیگر در گسترش تصفیه‌خانه، یک استراتژی می‌تواند تهیه حق مالکیت زمین‌های مجاور برای ساخت تصفیه‌خانه یا توانایی ساخت تصفیه‌خانه در کمترین فضای ممکن باشد (Wong, 2013). لذا رویکرد انعطاف‌پذیری به خودی خود نمی‌تواند سیستم را تقویت کند و بلکه به‌عنوان مکمل سایر رویکردها بکار گرفته می‌شود.

۶- ابعاد مشترک و غیرمشترک تاب‌آوری، استواری و انعطاف‌پذیری

از ابعاد مشترک انعطاف‌پذیری و استواری می‌توان به پژوهش (Levin and Lubchenco, 2008) اشاره کرد که از این دو رویکرد به‌جای یکدیگر در زمینه سیستم‌های دریایی استفاده کرده‌اند. لذا گاهی اوقات استواری سیستم به‌عنوان یک ویژگی اصلی از سیستم‌های انعطاف‌پذیر (Spiller et al., 2015) دیده می‌شود؛ همچنین، سیستم‌های انعطاف‌پذیر احتمالاً عملکرد بدون تغییر (یا عملکرد استوار) سیستم را حفظ می‌کنند (Loonen et al., 2013). در نتیجه، این رویکردها گاهی اوقات به‌جای یکدیگر نیز به کار گرفته می‌شوند. در رابطه با عدم اشتراک این دو رویکرد، Ku (1995) اظهار داشته است که انعطاف‌پذیری توانایی ذاتی اصلاح سیاست برای تطبیق و وفق موفقیت‌آمیز با تغییرات است، در حالی که استواری به توانایی تحمل تغییرات اشاره دارد.

یکی از روش‌های رایج برای در نظر گرفتن انعطاف‌پذیری در تصمیم‌گیری‌های پیرامون مبحث آب، حفاظت در مقابل سیل از طریق توانمندسازی توسعه موقعیت دفاع در مقابل سیل به‌عنوان مثال ساخت و توسعه سیل‌بندها است (Anvarifar, 2017). جدا از تلاش برای تعبیه^{۲۰} و ارزیابی انعطاف‌پذیری در مدیریت ریسک سیل، تعداد محدودی از پژوهش‌ها نیز جنبه‌های دیگر مربوط به مفهوم انعطاف‌پذیری را در نظر گرفته‌اند. به‌عنوان مثال، Difrancesco and Tullos (2015) پنج ویژگی را برای ارزیابی مدیریت ریسک سیل در افزایش انعطاف‌پذیری در دستیابی به اهداف از پیش تعریف‌شده سیستم‌های آبی را تعریف کردند:

• سست بودن (ظرفیت مازاد)^{۲۱}: درجه ظرفیت اضافی یا کم

استفاده (منظور از این ویژگی، ظرفیت مازاد و پتانسیل موجود است که در تمام اوقات استفاده نمی‌شوند)؛ مثال: ظرفیت ذخیره‌سازی سیل مخزن بیش از حجم سیل طراحی؛

• فراوانی^{۲۲}: میزان تکرار و تنوع گزینه‌های موجود برای تحقق

اهداف؛ مثال: تعداد تأسیسات ذخیره سیل درون سیستم؛

• اتصال^{۲۳}: توانایی هر مؤلفه برای اتصال به هر یک از اجزای دیگر

در داخل و خارج از سیستم؛ مثال: تعداد عملیات بهره‌برداری مشترک؛

• قابلیت تنظیم: امکان اضافه کردن، تغییر و حذف هر مؤلفه‌ای از

سیستم و عملکردهای آن؛ مثال: سطح تأیید دولتی مورد نیاز برای تنظیم عملیات برنامه مخزن (منحنی فرمان) یا تخصیص ذخیره‌سازی؛

• همکاری: توانایی استفاده و به اشتراک گذاری اطلاعات در دسترس

در بین مؤلفه‌ها؛ مثال: استفاده از سیستم‌های پشتیبانی.

در زمینه مطالعات آبی، بحث انعطاف‌پذیری اغلب در زمینه طراحی و همچنین ارزیابی سیستم‌های توزیع آب کاربرد داشته است که در ادامه به تعدادی از آن‌ها اشاره می‌شود. Basupi and Kapelan (2015) عملکرد سیستم‌های توزیع آب را مورد تجزیه و تحلیل قرار دادند و اهمیت طراحی انعطاف‌پذیر سیستم‌های توزیع آب را نشان دادند. Gheisi et al. (2015) مطالعه‌ای را پیرامون تکنیکی ساده مبتنی بر آنالیز تصمیم‌گیری چندمعیاره برای رتبه‌بندی مجموعه طرح‌های سیستم توزیع آب بر اساس سطح انعطاف‌پذیری آن‌ها تحت عدم قطعیت‌های مکانیکی و هیدرولیکی آینده انجام دادند. Wong (2013) در پژوهش خود به ارائه رویکرد طراحی انعطاف‌پذیر برای حمایت از تصمیم‌گیری در برنامه‌ریزی زیرساخت‌های آبرسانی پرداخته است.

سیستم به طور مداوم پایش می‌شوند و در این حالت، تغییر سیستم هنگامی اتفاق می‌افتد که تغییرات مشاهده شده، نیاز به اقدام را نشان دهند (Anvarifar, 2017)؛ اما تاب‌آوری نشان‌دهنده یک روش منفعل‌تر برای مدیریت عدم قطعیت است. بدین معنا که ابتدا عدم قطعیت اتفاق می‌افتد و سپس تاب‌آوری بکار گرفته می‌شود؛ زیرا پیکربندی سیستم در مرحله طراحی اولیه به گونه‌ای بهبود می‌یابد که نیاز به تغییرات پیکربندی قابل توجه در آینده را کاهش دهد (Anvarifar, 2017). این موضوع بدان معناست که در رویکرد انعطاف‌پذیری برای یک بار پیش از آشکار شدن عدم قطعیت، تغییرات ساختاری انجام می‌شود؛ اما در تاب‌آوری به تعداد عدم قطعیت پیش آمده، تغییرات ساختاری صورت می‌گیرد (Chalupnik et al., 2013; McConnell, 2007; de Neufville et al., 2004).

Husdal (2008) مطابق با شکل ۱، سه رویکرد استواری، تاب‌آوری و انعطاف‌پذیری را به صورت زیر تعریف می‌کند: استواری توانایی تطبیق با رویدادهای آینده است به گونه‌ای که هنوز بتوان به وضعیت آینده مطلوب رسید؛ انعطاف‌پذیری توانایی به تعویق انداختن، کنار گذاشتن، گسترش یا بکار بستن هرگونه تلاش در جهت رسیدن به هدف مورد نظر است؛ تاب‌آوری توانایی سیستم برای بازگشت به حالت اولیه خود و حرکت به حالت مطلوب جدید پس از ایجاد اختلال است.

با توجه به مطلب بیان‌شده، تاب‌آوری، استواری و انعطاف‌پذیری عملاً منحصر به فرد نیستند و با یکدیگر همپوشانی دارند. به عنوان مثال Klijin et al. (2014) و همچنین Mens (2015) از اصطلاح استواری برای دفاع در مقابل سیل استفاده کردند تا سیستمی را نشان دهند که می‌تواند با استفاده از ترکیب دو راهکار، عدم حساسیت نسبت به تغییر (مقاومت) و بازگشت از عواقب (آثار) تغییر (تاب‌آوری)، فشارهای موقت وارد شده از خارج را مدیریت کند (Klijin et al., 2014; Mens, 2015). از یک طرف Ruhl (2010) تاب‌آوری را زیرمجموعه استواری سیستم در نظر گرفته است. از طرفی دیگر، برخی از محققان نیز انعطاف‌پذیری و استواری سیستم را به عنوان زیرمجموعه تاب‌آوری طبقه‌بندی کرده‌اند (Nelson et al., 2007; Ross and Rhodes, 2015). ویژگی‌های سه رویکرد فوق در شکل ۲ به صورت خلاصه ارائه شده است. با این حال باید توجه داشت که رویکردهای فوق در مواجهه با عدم قطعیت، رویکردهایی کامل و جامع نیستند و هریک نقاط قوت و ضعف مربوط به خود را دارند. در این راستا یکی دیگر از رویکردهای مواجهه با عدم قطعیت که ریشه آن به حدود یک قرن پیش بازمی‌گردد و در مباحث آبی از آن استفاده می‌شود، رویکرد سازگاری است. با توجه به این موضوع، در ادامه به تشریح مفصل‌تر

در رابطه با دو رویکرد تاب‌آوری و استواری می‌توان گفت که در طراحی اولیه سیستم، بر کاهش یا اجتناب^{۳۴} از اثرات منفی تغییرات نامشخص آینده (برای مثال افزایش سطح دریا) متمرکز هستند (Dossou and Glehouenou-Dossou, 2007). از این رو، در این رویکردها امکان رخداد تغییرات سیستم در آینده به صراحت مورد توجه قرار نمی‌گیرد (Anvarifar, 2017). لذا باید توجه داشت که نادیده گرفتن اصلاح سیستم بهنگام تغییر شرایط، ممکن است مانع از پاسخ مناسب سیستم یا عدم کارایی سیستم در پاسخ به تغییر(ها) شود. به بیان دیگر، این رویکردها با توجه به اتفاقاتی که در گذشته رخ داده‌اند تصمیم‌گیری انجام می‌دهند و به تغییرات طبیعت خود سیستم‌ها توجه ندارند. با توجه به این موارد، به دلیل اینکه با توجه به سابقه تاریخی سیستم برنامه‌ریزی اقدام‌ها انجام می‌شوند لذا به عنوان مثال، پیش‌بینی خشک شدن دریاچه ارومیه با استفاده از این رویکردها امکان‌پذیر نبود؛ زیرا خشک شدن دریاچه ارومیه واقعه‌ای نوظهور است و برای اولین بار رخ داده است.

تفاوت دو رویکرد تاب‌آوری و استواری در درجه عدم حساسیت سیستم نسبت به تغییرات است (Anvarifar, 2017). به عبارت دیگر، مفهوم تاب‌آوری شامل تداوم و بازیابی است (McPhearson et al., 2015)؛ اما مفهوم استواری دربرگیرنده مقاومت است (Walker et al., 2013a). یک سیستم استوار می‌تواند قبل، در طی و پس از اختلال هویت و عملکرد پیشین خود را حفظ کند؛ اما یک سیستم تاب‌آور ممکن نیست که در طول وقوع یک تغییر، ثابت باقی بماند. به عبارت دیگر انتظار می‌رود که به سرعت به حالت پیش از آشفتگی خود بازگردد. در مباحث آبی می‌توان این دو رویکرد را بدین صورت بیان کرد: فرض بر این گرفته می‌شود که سیلابی در حال رخداد است. تحت رویکرد استواری، سیستم برای محتمل‌ترین سناریو ممکن طراحی شده است و در صورتی که پیش‌بینی‌ها درست بوده باشند، سیستم هیچ‌گونه آسیبی نخواهد دید. اما در صورتی که سیستم با استفاده از رویکرد تاب‌آوری مدیریت شود، به سیستم فشار وارد می‌شود و آسیب می‌بیند اما با استفاده از مکانیسم‌هایی مانند بیمه، سرمایه اجتماعی و چنین مؤلفه‌هایی سیستم در مدت کوتاهی به حالت پیشین خود بازمی‌گردد.

اشتراک بین یک سیستم انعطاف‌پذیر و یک سیستم تاب‌آور این است که هر دو اصطلاح به وضعیتی اطلاق می‌شوند که با توجه به ظرفیت یادگیری از طریق زمان، به بررسی عدم قطعیت می‌پردازند (Gersonius et al., 2013; Klein et al., 2003). اما نحوه عملکرد این دو رویکرد متفاوت است. اساساً انعطاف‌پذیری یک رویکرد سازگاری فعال را نشان می‌دهد که در آن تغییرات خارجی و داخلی

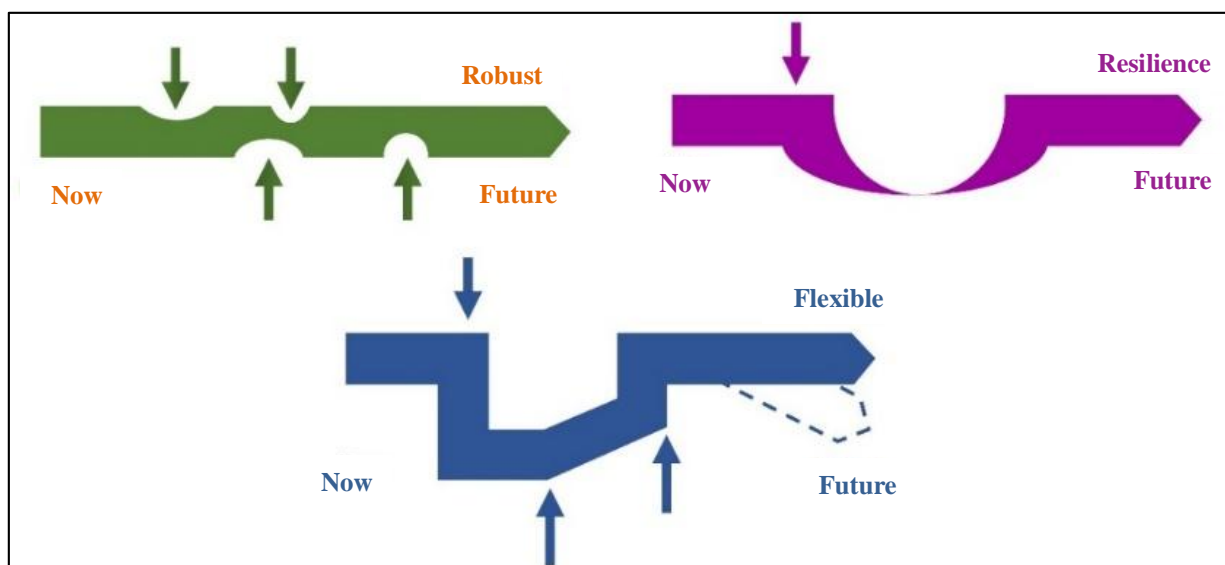


Fig. 1- Comparison of three approaches: robustness, flexibility and resilience (Husdal, 2008) (Arrows indicate the passage of time)

شکل ۱- مقایسه سه رویکرد استواری، انعطاف‌پذیری و تاب‌آور (Husdal, 2008) (فلش‌ها بیانگر گذر زمان است)

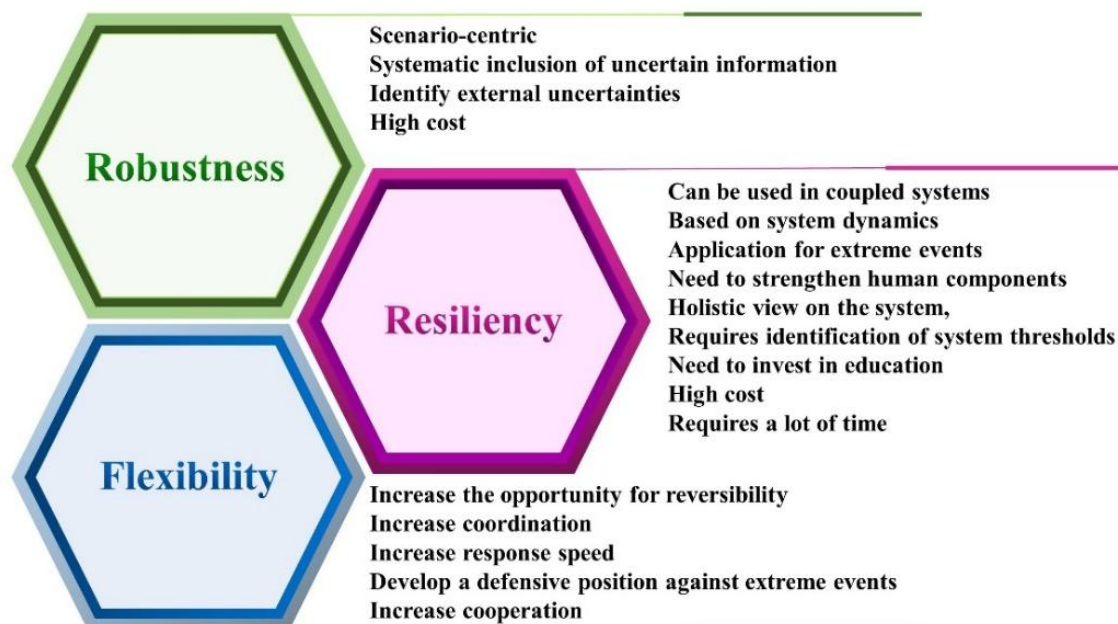


Fig. 2- Practical features of robustness, resilience, and flexibility approaches in water issues

شکل ۲- ویژگی‌های کاربردی رویکردهای استواری، تاب‌آوری و انعطاف‌پذیری در مسائل آبی

طبیعی و به‌ویژه زیست‌شناسی تکاملی دارد (Smit and Wandel, 2006). با این حال، سازگاری مفهومی است که از گذشته در علوم مختلف کاربردهای متفاوت و متعددی داشته است و علوم مختلف متناسب با زمینه تحقیقاتی خود، برداشت‌ها و تفسیرهای متفاوتی از مفهوم سازگاری داشته‌اند. از این رو، متناسب با زمینه‌های تحقیقاتی مختلف، تعاریف متفاوتی نیز برای سازگاری ارائه شده است. به بیان

آن نسبت به سایر رویکردها، پرداخته می‌شود.

۷- سازگاری

آخرین رویکرد مواجهه با عدم قطعیت که در این مقاله مورد بررسی قرار می‌گیرد، رویکرد سازگاری است. اصطلاح سازگاری ریشه در علوم

یکی دیگر از ویژگی‌های اقدام‌های سازگار، ارتباط آن‌ها با ارزش‌ها و هنجارهای اجتماعی است. (2007) Nelson et al. سازگاری را جریانی مداوم از فعالیت‌ها، اقدام‌ها، تصمیم‌ها و گرایشاتی تعریف کرده‌اند که تصمیم‌گیری تمام جنبه‌های زندگی را تحت تأثیر قرار می‌دهد و علاوه بر منعکس کردن هنجارها و فرآیندهای اجتماعی موجود، اهداف هنجاری^{۲۵} ذی‌نفعان را برآورده می‌کند؛ به‌عنوان مثال، در استان سیستان و بلوچستان سازوکارهای بومی بسیاری برای استفاده از آب از گذشته وجود داشته است. یکی از این سازوکارها «خَشر» نام داشت و سازوکار آن بدین صورت بود که افراد کشاورز به دست خود کانال‌های آبیاری را لایروبی می‌کردند و هر خانوار به میزان کمک در اجرای این فرآیند، آب مورد نیاز برای کشاورزی خود را دریافت می‌کرد. با مکانیزه و مدرن شدن تجهیزات آبرسانی این سنت که خود بخشی از فرآیند بزرگتری بود از میان به کنار رفت؛ بدین معنا که ورود سازوکارهای جدید باعث از بین رفتن و تغییر ارزش‌ها و هنجارهای پیشین شده است که این موضوع می‌تواند تبعات منفی زیادی را در پی داشته باشد و این مثال، نمودی از یک اقدام ناسازگار است.

ساده، سازگاری مجموعه‌ای از اقدام‌ها، فعالیت‌ها و تصمیم‌گیری‌ها با هدف کاهش آسیب‌پذیری در مقابل تغییرات است. هدف هر یک از اقدام‌ها، فعالیت‌ها و تصمیم‌گیری‌های مذکور، متناسب با زمینه تحقیقاتی مدنظر مشخص خواهد شد. در جدول ۵ تعدادی از تعاریف سازگاری ارائه شده است و در ادامه به تشریح و تبیین این رویکرد پرداخته شده است.

یکی از ویژگی‌های سازگاری این است که محدود به بازه زمانی خاصی نیست و فرآیند-محور است و به همین علت تنظیمات سیستم‌های فعلی، تغییر خواهند کرد و به‌احتمال زیاد نیاز به مجموعه‌ای جدید از پاسخ‌ها به وجود خواهد آمد (Nelson et al., 2007). بر این اساس، اقدام‌های سازگاری با تغییر شرایط تغییر خواهند کرد؛ اما همچنین این امکان وجود دارد که اقدام‌های مذکور حالتی دائمی به خود بگیرند و نیازمند تغییر نباشند اما به‌طور کلی سازگاری‌ها به‌ندرت دائمی می‌شوند (Janssen et al., 2007).

Table 5- Different definitions for adaptation concept
جدول ۵- تعاریف مختلف ارائه شده برای مفهوم سازگاری

Definition	Reference
Adaptation is a state of the system in which the system behaves effectively in relation to the environment.	(Young et al., 2006)
Adaptation in the natural sciences broadly refers to the development of genetic or behavioral traits that enable organisms and systems to cope with environmental changes in order to survive and reproduce.	(Futuyma, 1979; Kitano, 2002; Winterhalder, 1980)
In the field of climate change, adaptation has been defined as "adjustments in ecosystem-socio-economic systems in response to current or expected environmental stimuli and their effects".	(Smit et al., 2000)
In the field of climate change, adjustments and coordination in individual groups and institutional behaviors in order to reduce the vulnerability of society to climate change is called adaptation.	(Pielke, 1998)
In the context of climate change, adaptation can also be considered as community-based (or local) arrangements to cope with changing conditions in the broader socio-economic and political contexts; This means that adaptation measures are defined and implemented in accordance with each region, neighborhood, or community..	(Smit and Wandel, 2006)
Adaptation to Climate Change in Human Systems is the process of adjusting to current or expected climatic conditions and their effects in order to mitigate harm or take advantage of opportunities.	(IPCC, 2018)
Adaptation to natural systems is the process of adjusting to current climate conditions and their effects, and human intervention may facilitate adaptation to expected climatic conditions and their effects.	(IPCC, 2018)
Adaptation is the decision-making process and set of actions committed to maintaining the capacity to cope with future changes or disruptions in the socio-ecological system without significant changes in performance, structural identity, or system feedback while maintaining development option(s).	(Nelson et al., 2007)
Adaptation means people adjusting to current or anticipated changes.	(Nelson et al., 2007)
Adaptation to environmental changes to coordinate ecological, social, or economic systems in response to existing or expected changes in environmental stimuli and their effects to reduce the side effects of changes.	(Berkhout et al., 2006; JANSSEN, 2006; Pielke, 1998; Smit and Pilifosova, 2001; Smit and Wandel, 2006)
Behavior settings and system characteristics increase its ability to cope with external stresses.	(Brooks, 2003)
Adaptation is often imposed on communities due to unintended external changes, and the main goal of most adaptation measures is to reduce vulnerability.	(Nelson et al., 2007)

زمانی بلندمدت و با هدف کاهش آسیب‌پذیری است که در حین حفظ گزینه‌های توسعه، انعکاس‌دهنده هنجارها و فرآیندهای اجتماعی موجود است و دارای سطوح متفاوت زمانی و مکانی است.»

۷-۱- نواقص سازگاری

شاید اولین و بزرگترین ضعف این رویکرد، هزینه‌های مربوط به آن باشد. این رویکرد به دلیل اینکه بر روی زیرساخت‌های سیستم دست می‌گذارد و همچنین به دلیل اینکه ذی‌مدخلان زیادی را برای دستیابی به اهداف درگیر می‌کند، هزینه‌های اقتصادی بسیار زیادی را در پی دارد. با این حال باید توجه داشت به دلیل اینکه این رویکرد هم به تغییرات داخلی سیستم و همچنین به تغییرات خارجی توجه دارد، هزینه‌های اقتصادی بیشتری را نیز در بر می‌گیرد؛ زیرا ضروری است که برای طیف گسترده‌ای از حالات مختلف سیستم برنامه‌ریزی کوتاه‌مدت و بلندمدت انجام گیرد. لذا تمامی این موارد به هزینه‌های مربوط به این رویکرد اضافه می‌کنند. همچنین، باید توجه داشت هزینه‌های زیاد خود نیز می‌توانند بر روی تغییرات خارجی اثرگذار باشند و بدین صورت هزینه زیاد خود نیز می‌تواند بر عدم قطعیت سیستم بیافزاید.

با توجه به اینکه رویکرد سازگاری ذی‌مدخلان زیادی را درگیر می‌کند و فرآیندمحور است، لذا بصورت مداوم نیازمند اقدام‌های جدید است که این اقدام‌ها زمان بسیار زیادی را می‌طلبند. دلیل صرف زمان زیاد از آن روست که سازگاری، نیازمند آموزش به نسل‌ها یا به تعبیری نسل‌سازی است و همچنین این رویکرد نسبت به دیگر رویکردها دامنه وسیع‌تری را در بر می‌گیرد و تمامی این عوامل، به زمان مورد نیاز برای اتخاذ این رویکرد می‌افزایند. در شکل ۳ ویژگی‌های سازگاری به صورت خلاصه ارائه شده است.

با توجه به آنکه تغییر یکی از جنبه‌های اساسی هر سیستم است، سطح سازگاری سیستم نیز با تغییر در زمینه سیستم، تعریف خواهد شد (Nelson et al., 2007). باید توجه داشت که سطوح مختلف سازگاری بر اساس نوع، تناوب و بزرگی اختلالات سیستم، تعریف می‌شوند. لذا اقدام‌های سازگاری در مقیاس‌های مختلف انجام می‌شوند؛ به‌عنوان مثال، ممکن است مقیاس محلی یا جهانی داشته باشند. همچنین، اختلالات سیستم نه تنها بر سطح سازگاری تأثیر می‌گذارند، بلکه بر ویژگی‌های سیستم و انواع فرآیندهای سازگاری نیز تأثیرگذارند (Nelson et al., 2007).

از دیدگاه زمان‌بندی، سازگاری می‌تواند کنشی (پیش‌بینی‌شده) یا واکنشی باشد (Fankhauser et al., 1999; Smith et al., 2000). به بیان دیگر، سازگاری می‌تواند به صورت خودجوش یا نتیجه فرآیندهای سیاست‌های حساب‌شده باشد (Nelson et al., 2007). گزارش ارزیابی چهارم هیأت بین‌الدولی تغییر اقلیم، سازگاری برنامه‌ریزی‌شده^{۲۶} و سازگاری خودمختار^{۲۷} را بدین صورت تعریف کرده است (IPCC, 2007): سازگاری برنامه‌ریزی‌شده، نتیجه یک تصمیم سیاست آگاهانه است که مبتنی بر آگاهی از این موضوع است که شرایط تغییر کرده است و یا در حال تغییر است و این اقدام برای بازگشت، حفظ یا دستیابی به وضعیت مطلوب است؛ سازگاری خودمختار نیز در پاسخ به تغییر شرایط اقلیمی تأثیرات آن، بدون برنامه‌ریزی صریح یا آگاهانه در پرداختن به تغییر اقلیم صورت می‌گیرد. در نتیجه سازگاری با توجه به نوع اختلال و تغییر می‌تواند واکنشی به معنای اقدام‌های کوتاه‌مدت یا پیش‌بینی‌شده به معنای اقدام‌های طراحی‌شده برای بلندمدت باشد.

با توجه به تعاریف و ویژگی‌های بالا، تعریفی جامع در رابطه با سازگاری بدین صورت است: «سازگاری فرآیندی مداوم و مجموعه‌ای از اقدام‌ها در مواجهه با تغییرات جاری یا پیش‌بینی‌شده اغلب خارجی، در مقیاس

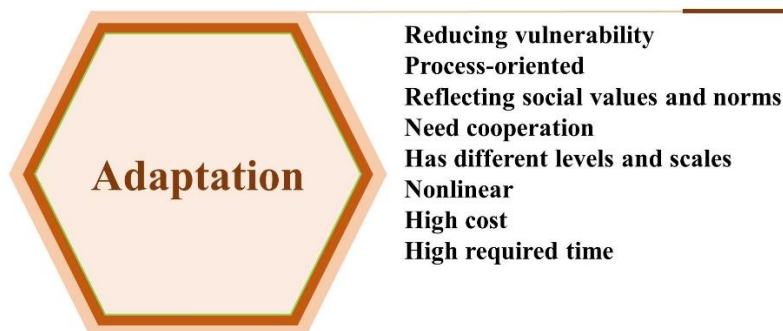


Fig. 3- Practical features of adaptation approach in water issues

شکل ۳- ویژگی‌های کاربردی رویکرد سازگاری در مسائل آبی

۷-۲- محدودیت‌های رویکرد سازگاری

در صورت عدم سازگاری به‌موقع با تغییرات، توانایی سازگاری در آینده کاهش می‌یابد. از این‌رو، محققان حقوق و امنیت غذایی، سازگاری را به‌عنوان پاسخ به تنش‌ها که دسترسی به منابع و توانایی افراد برای مقابله با آن تنش را مورد تهدید قرار می‌دهد، در نظر می‌گیرند (Adger, 2000; Adger and Kelly, 1999; Downing, 1991). با این حال، باید توجه داشت که این موضوع بدان معنی نیست که در صورت عدم سازگاری، فرصت‌ها کاملاً از بین می‌روند. بلکه بدان معناست که تعداد فرصت‌ها کاهش می‌یابند و همچنین سازگاری سخت‌تر صورت خواهد گرفت. بر این اساس، همیشه اقدام‌هایی جهت انجام در دسترس هستند. همچنین، باید توجه داشت که هر مقدار اقدام‌های سازگاری دیرتر پیاده‌سازی شوند، می‌توانند هزینه‌های اقتصادی بیشتری را نیز در پی داشته باشند. در این زمینه می‌توان به سازگاری با تغییر اقلیم اشاره کرد. به عنوان مثال، هر مقدار که فرآیند سازگاری با تغییر اقلیم در بخش کشاورزی دیرتر شروع شود می‌توان انتظار داشت که هزینه‌های اقتصادی بیشتری را به همراه داشته باشد. دلیل این امر می‌تواند این باشد که کشاورزی و افراد بیشتری تحت تأثیر قرار خواهند گرفت. همچنین، هنگامی که به دلیل افزایش مصرف آب، برداشت از آب زیرزمینی به مرور زمان افزایش پیدا می‌کند، به تبع آن نیز فرصت سازگاری کاهش پیدا می‌کند؛ به عنوان مثال، در حالی که برداشت از آب زیرزمینی به میزان ۴۰ درصد از آب تجدیدپذیر است، فرصت سازگاری بیشتری نسبت به حالتی که برداشت از آب زیرزمینی به میزان ۷۰ درصد است، در دسترس خواهد بود.

اقدام‌های سازگاری غیرخطی هستند و ممکن است با گذشت زمان تغییر کنند. این اقدامات لزوماً همیشه مثبت نیستند (Gemenne and Blocher, 2017). بدین معنا که ممکن است گاهی اوقات، نتایج منفی برای سیستم در کوتاه‌مدت یا بلندمدت در پی داشته باشند. به عبارت دیگر، اقدام‌های سازگاری خاص ممکن است تأثیر مثبت کوتاه‌مدت داشته باشند، درحالی‌که منجر به نتایج منفی در بلندمدت شوند (Andersson Sköld et al., 2015; Brooks et al., 2009; Mycoo, 2014). و همچنین برعکس این موضوع نیز می‌تواند اتفاق بیفتد. به عنوان مثال می‌توان به پژوهش (Aghaie et al., 2020) اشاره کرد که نتایج کسب‌شده توسط آن‌ها نشان داد که بازار آب، نتایج مناسبی را برای سیستم‌های آبی به همراه دارد. با این حال باید توجه کرد که بازار آب در بلندمدت می‌تواند این دیدگاه را ایجاد کند که آب جزئی از حقوق مردم نیست و به عنوان کالای تجاری تلقی شود و با توجه به این مورد می‌تواند در درازمدت اثرات منفی را در پی داشته باشد.

۸- مقایسه رویکرد سازگاری با رویکردهای تاب‌آوری،

استواری و انعطاف‌پذیری

تاب‌آوری بر روی مؤلفه‌های اجتماعی چون سرمایه اجتماعی و شایستگی جامعه دست می‌گذارد؛ اما سازگاری بر روی مؤلفه‌هایی چون قابلیت خودسازمان‌دهی و ظرفیت یادگیری سیستم سرمایه‌گذاری می‌کند. لذا از منظر سرمایه‌گذاری بر روی مؤلفه‌های انسانی، این دو رویکرد با یکدیگر رقابت می‌کنند. نقطه قوت سازگاری آن است که می‌تواند بصورت خودجوش درون سیستم رخ دهد؛ اما رویکرد تاب‌آوری در این زمینه عملکرد متفاوتی دارد و با توجه به تعاریف ارائه شده، تحت این رویکرد سیستم تطبیق پیدا نمی‌کند بلکه ضربه را تحمل می‌کند و از آن آسیب می‌بیند و پس از مدتی به حالت اولیه خود بازمی‌گردد.

عملکرد رویکرد استواری بدین صورت است که با استفاده از سناریوپردازی‌های مختلف، محتمل‌ترین سناریو برای برنامه‌ریزی سیستم بکار گرفته می‌شود و این سناریوپردازی‌ها با استفاده از سوابق تاریخی سیستم انجام می‌شوند. لذا در صورت بروز واقعه‌ای نوظهور، ممکن است که سیستم قادر به واکنش مناسب نسبت به واقعه نباشد. پاسخ رویکرد سازگاری در بروز واقعه نوظهور متفاوت است؛ زیرا رویکرد سازگاری، علاوه بر برنامه‌ریزی بر مبنای سوابق تاریخی سیستم، بر روی مؤلفه‌های دیگر سیستم چون سرمایه اجتماعی جهت تطبیق یافتن با تغییرات نیز سرمایه‌گذاری انجام می‌دهد و لذا در مواجهه با عدم قطعیت‌های جدید و نوظهور، سیستم قادر به پاسخ مناسب‌تری خواهد بود.

از رویکرد انعطاف‌پذیری نیز نمی‌توان در مدیریت کل سیستم استفاده کرد و شاید بتوان برخی از بخش‌ها را با استفاده از آن مدیریت کرد؛ زیرا همانطور که بیان شد انعطاف‌پذیری هدف عملکردی نیست. به‌عنوان مثال تحت این رویکرد مسیر سیستم قابل تعیین نیست و هنگامی که تکانه‌هایی به سیستم وارد می‌شوند، سیستم تغییر مسیر می‌دهد. اما در رویکرد سازگاری چنین نیست و هدف آن است که با حفظ مسیر اصلی سیستم و همچنین با انجام اقدام‌های جدید علاوه بر پذیرش و تطبیق با آن‌ها، مسیر اصلی سیستم نیز حفظ شود.

۹- نتیجه‌گیری

رویکردهای بسیار زیادی با هدف مواجهه با عدم قطعیت وجود دارند. این مقاله به بررسی کاربرد چهار رویکرد تاب‌آوری، استواری، انعطاف‌پذیری و سازگاری در مباحث آبی پرداخت. در ابتدا به تعریف و

ذاتی هر رویکرد، می‌توان از آن‌ها در مدیریت بخش‌های مختلف سیستم‌های آبی بهره برد. به عبارت دیگر، با اینکه رویکرد سازگاری، رویکردی مناسب در مدیریت سیستم‌های آبی است؛ اما در مدیریت بخش‌های مختلف سیستم‌های آبی می‌توان از سایر رویکردها نیز بهره برد. به عنوان مثال، در مدیریت بخش مربوط به وقایع حدی می‌توان از رویکرد تاب‌آوری بهره برد.

پی‌نوشت‌ها

- 1- Emerging
- 2- Complex
- 3- Evolutionary
- 4- Variability
- 5- Deep Uncertainty
- 6- Resilience
- 7- Robustness
- 8- Flexibility
- 9- Adaptation
- ۱۰- Reductionism: تقلیل‌گرایی به عنوان موضعی فکری و فلسفی توصیف می‌شود که یک سیستم درهم‌تنیده را به صورت جمع اجزای آن تفسیر می‌کند (Kricheldorf, 2016).
- 11- Holistic
- ۱۲- Social Capital: سرمایه اجتماعی منعکس‌کننده میزان آگاهی مردم نسبت به مسائل، میزان ارتباطات متقابل آن‌ها با یکدیگر (وضعیت شبکه اجتماعی در جامعه)، میزان اعتماد مردم به یکدیگر و به دولت و همچنین مشارکت اجتماعی است.
- ۱۳- Community Competent: شایستگی جامعه استعداد جمعی افراد برای یادگیری در مورد محیط اجتماعی خود و استفاده از اطلاعات برای شناسایی مشکلات و ایجاد اجماع برای رفع مشکلات جمعی برای رفع نیازهای جامعه است.
- ۱۴- آستانه‌های تحمل سیستم‌های آبی را مؤلفه‌های گوناگونی تعیین می‌کنند که می‌توان به موارد زیر اشاره کرد: سرمایه اجتماعی، نسبت جمعیت شهری و روستایی، زیرساخت‌های مدیریت سیل (سیستم پیش‌بینی، اختار و چنین مواردی)، بیمه و دیگر مؤلفه‌ها.
- 15- Proactive Mitigation and Adaptation Actions
- 16- Scoping
- 17- Exogenous Uncertainties
- ۱۸- منظور از عدم قطعیت‌های ضعیف، آن دسته از عدم قطعیت‌ها هستند که ابعاد و سطح بزرگی ندارند و بخش بزرگی از آن‌ها را می‌توان پیش‌بینی کرد.
- 19- Robust Dynamic Adaptive Policy Pathways
- 20- Embedding
- 21- Slack
- 22- Redundancy
- 23- Connectivity
- 24- Avoiding or Alleviating
- 25- Normative Goals
- 26- Planned Adaptation
- 27- Autonomous Adaptation

بررسی نقاط ضعف و قوت سه رویکرد اول پرداخته شد. سپس، با توجه به ویژگی‌های رویکرد سازگاری، این رویکرد به عنوان رویکردی جامع‌تر از سه رویکرد دیگر مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به تعاریف و ویژگی‌های ارائه شده در ادبیات برای مفهوم سازگاری، سعی بر این شد که تعریفی جامع برای این مفهوم ارائه شود که تمامی جوانب را در نظر بگیرد. این رویکرد با توجه به اینکه نسبت به دیگر رویکردها از ویژگی‌های مناسب‌تری برخوردار است اما نواقصی نیز دارد. با این حال این رویکرد به دلیل اینکه توانایی مواجهه با تغییرات داخلی و خارجی سیستم را دارد؛ باعث می‌شود در مواجهه با وقایع نوظهور، توانایی بیشتر در کسب موفقیت داشته باشد که این موضوع برتری زیادی به رویکرد سازگاری نسبت به سایر رویکردها می‌دهد. همچنین، باید توجه داشت که رویکرد سازگاری چارچوبی بسیار کلی است که در سطوح مختلف مدیریتی مانند سیاست‌گذاری و تصمیم‌گیری به کار گرفته می‌شود. بر این اساس به دلیل اینکه سیستم‌های آبی در زمره سیستم‌های درهم‌تنیده جفت‌شده طبیعی - انسانی جای می‌گیرند و هر یک از این بخش‌ها عدم قطعیت‌های سیستم را افزایش می‌دهند، رویکرد سازگاری به دلیل ویژگی‌های که در متن بدان پرداخته شد، در مقایسه با سایر رویکردها، رویکردی مناسب برای مدیریت سیستم‌های آبی در سطوح مختلف حکمرانی و مدیریت است.

در سیستم‌های آبی باید توجه داشت که نمی‌توان بر روی یک بخش متمرکز شد و تنها یک بخش را بهبود بخشید زیرا سیستم‌های آبی درهم‌تنیده هستند و بخش‌های مختلف بر روی یکدیگر تأثیر گذارند. به عنوان مثال در حوضه دریاچه ارومیه، اقدام‌های صورت گرفته بیشتر بر منابع آب سطحی متمرکز دارند در صورتی که کشاورزان و باغداران بسیار زیادی در این حوضه از چاه‌های آب استفاده می‌کنند. بدین معنا که اقدام‌هایی که تنها با تمرکز بر یک بخش مانند آب‌های سطحی صورت می‌گیرند نمی‌توانند به‌تنهایی کارگر باشند؛ زیرا که گرداران می‌توانند به بخش‌های دیگر مانند آب‌های زیرزمینی روی بیاورند و فشار بیشتری بر سیستم تحمیل کنند. به عنوان مثالی دیگر، در استان سیستان و بلوچستان ساخت گلخانه جهت سازگاری با کم‌آبی در پیش گرفته شد؛ اما پس از مدتی به دلیل افزایش هزینه‌های گلخانه، افراد علاوه بر اینکه به کشت گلخانه‌ها روی نیاوردند، بلکه شروع به فروش سوخت یارانه‌ای مربوط به گلخانه کردند که مشکلات متعددی را به پیش آورد. از این رو ضروری است که به سیستم‌های آبی با استفاده از رویکردهای جامع‌نگر نگاه شود.

باید توجه داشت که نتایج فوق به معنای این نیستند که سایر رویکردها در مدیریت سیستم‌های آبی کارایی ندارند، بلکه با توجه به ویژگی‌های

۱۰- مراجع

- Adger WN (2000) Institutional adaptation to environmental risk under the transition in Vietnam. *Annals of the Association of American Geographers*, Wiley Online Library 90(4):738–758
- Adger WN, Arnell NW, and Tompkins EL (2005) Successful adaptation to climate change across scales. *Global Environmental Change*, Elsevier 15(2):77–86
- Adger WN and Kelly PM (1999) Social vulnerability to climate change and the architecture of entitlements. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*. Springer 4(3–4):253–266
- Aghaie V, Alizadeh H, and Afshar A (2020) Emergence of social norms in the cap-and-trade policy: An agent-based groundwater market. *Journal of Hydrology* 588:125057
- Allen P (2001) What is complexity science? *Knowledge of the limits to knowledge*. *Emergence* 3(1):24–42
- Anderies JM (2015) Managing variance: Key policy challenges for the Anthropocene. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, National Acad Sciences 112(47):14402–14403
- Andersson Sköld Y, Thorsson S, Rayner D, Lindberg F, Janhäll S, Jonsson A, Moback U, Bergman R, and Granberg M (2015) An integrated method for assessing climate-related risks and adaptation alternatives in urban areas. *Climate Risk Management* 7:31–50
- Anvarifar F (2017) *Towards flexibility in the design and management of multifunctional flood defences*. Delft University of Technology
- Averch H (1990) *Private markets and public intervention: A primer for policy designers*. University of Pittsburgh Pre
- Basupi I and Kapelan Z (2015) Evaluating flexibility in water distribution system design under future demand uncertainty. *Journal of Infrastructure Systems* 21(2):04014034
- Bateson G (1972) *Steps to an ecology of mind: Collected essays in anthropology, psychiatry, evolution, and epistemology*. University of Chicago Press
- Berkes F, Colding J, and Folke C (2008) *Navigating social-ecological systems: Building resilience for complexity and change*. Cambridge University Press
- Berkhout F, Hertin J, and Gann DM (2006) Learning to adapt: Organisational adaptation to climate change impacts. *Climatic Change* 78(1):135–156
- Biswas AK and Tortajada C (2011) Water quality management: An introductory framework. *International Journal of Water Resources Development*, Taylor & Francis 27(1):5–11
- Brooks N (2003) Vulnerability, risk and adaptation: A conceptual framework. *Tyndall Centre for Climate Change Research Working Paper* 38(38):1–16
- Brooks N, Grist N, and Brown K (2009) Development futures in the context of climate change: Challenging the present and learning from the past. *Development Policy Review* 27(6):741–765
- Carpenter S, Walker B, Anderies JM, and Abel N (2001) From metaphor to measurement: Resilience of what to what? *Ecosystems* 4(8):765–781
- Carpenter SR, Folke C, Scheffer M, and Westley F (2009) Resilience: Accounting for the noncomputable. *Ecology and Society*, JSTOR 14(1)
- Chalupnik MJ, Wynn DC and Clarkson PJ (2013) Comparison of utilities for protection against uncertainty in system design. *Journal of Engineering Design*, Taylor & Francis 24(12):814–829
- Chen S and Gong B (2021) Response and adaptation of agriculture to climate change: Evidence from China. *Journal of Development Economics* 148:102557
- Davoudi S, Shaw K, Haider LJ, Quinlan AE, Peterson GD, Wilkinson C, Fünfgeld H, McEvoy D, Porter L, and Davoudi S (2012) Resilience: A bridging concept or a dead end? “Reframing” Resilience: Challenges for planning theory and practice interacting traps: Resilience assessment of a pasture management system in northern Afghanistan Urban Resilience: What does it mean in planning practice. *Planning theory & practice* Taylor & Francis 13(2):299–333
- De Leeuw ACJ (1976) The control paradigm as an aid for understanding and designing organizations. TH Eindhoven, Vakgr, organisatiekunde: rapport. Technische Hogeschool Eindhoven 36
- de Neufville R, de Weck O, Frey D, Hastings D, Larson R, Simchi-Levi D, Oye K, Weigel A, and Welsch R (2004) *Engineering systems monograph*. Engineering systems symposium
- De Ridder HAJ (1994) *Design & construct of complex civil engineering systems: A new approach to organization and contracts*. Delft University Press
- Demirel HC, De Ridder HAJ, and Hertogh M (2013) *Dynamic contracting: An asset management tool in controlling infrastructure maintenance activities*. 92nd Annual Meeting Transportation Research Board, Washington, USA, 13-17 January 2013; Authors version

- Demos TJ (1969) The politics of sustainability: Art and ecology. in *Radical Nature: Art and Architecture for a Changing Planet, 1969–2009*, ed. Francesco Manacorda and Ariella Yedgar (London: Barbican Art Gallery, 2009), 17-30. Reprinted in *Theory in Contemporary Art since 1985*, ed., Zoya Kocur and Simon Leung (London: Wiley-Blackwell, 2012), 466-485
- Dessai S, Hulme M, Lempert R, and Pielke Jr R (2009) Do we need better predictions to adapt to a changing climate? *Eos, Transactions American Geophysical Union*, Wiley Online Library 90(13):111–112
- Difrancesco KN and Tullios DD (2015) Assessment of flood management systems' flexibility with application to the Sacramento River basin, California, USA. *International Journal of River Basin Management* 13(3):271–284
- Dossou KMR and Glehouenou-Dossou B (2007) The vulnerability to climate change of Cotonou (Benin) the rise in sea level. *Environment and Urbanization*, SAGE Publications Sage UK: London, England 19(1):65–79
- Downing TE (1991) Vulnerability to hunger in Africa: A climate change perspective. *Global Environmental Change* 1(5):365–380
- Fankhauser S, Smith JB, and Tol RSJ (1999) Weathering climate change: some simple rules to guide adaptation decisions. *Ecological Economics* 30(1):67–78
- Fischbach JR (2010) Managing New Orleans flood risk in an uncertain future using non-structural risk mitigation. Ph.D. Dissertation, RAND Graduate School
- Fletcher SM (2018) Learning and flexibility for water supply infrastructure planning under diverse uncertainties. Massachusetts Institute of Technology
- Folke C (2006) Resilience: The emergence of a perspective for social–ecological systems analyses. *Global Environmental Change* 16(3):253–267
- Folke C (2016) Resilience (Republished). *Ecology and Society* 21(4):art44
- Folke C, Carpenter SR, Walker B, Scheffer M, Chapin T, and Rockström J (2010) Resilience thinking: Integrating resilience, adaptability and transformability. *Ecology and Society*, JSTOR 15(4)
- Foltz RC (2002) Iran's water crisis: Cultural, political, and ethical dimensions. *Journal of Agricultural and Environmental Ethics*. Springer 15(4):357–380
- Fricke E and Schulz AP (2005) Design for changeability (DfC): Principles to enable changes in systems throughout their entire lifecycle. *Systems Engineering* 8(4)
- Futuyma DJ (1979) *Evolutionary biology*. 565 pp. Sunderland, Mass: Sinauer Associates
- Gemenne F and Blocher J (2017) How can migration serve adaptation to climate change? Challenges to fleshing out a policy ideal. *The Geographical Journal* 183(4):336–347
- Gersonius B (2012) The resilience approach to climate adaptation applied for flood risk. IHE Delft Institute for Water Education
- Gersonius B, Ashley R, Pathirana A, and Zevenbergen C (2013) Climate change uncertainty: Building flexibility into water and flood risk infrastructure. *Climatic Change*. Springer 116(2):411–423
- Gheisi A, Shabani S, and Naser G (2015) Flexibility ranking of water distribution system designs under future mechanical and hydraulic uncertainty. *Procedia Engineering* 119:1202–1211
- Goulter IC, Awumah K, and Bhatt S (1992) Optimising water distribution network design using entropy surrogates for network reliability. *Entropy and Energy Dissipation in Water Resources* 239–259
- Groves DG (2005) New methods for identifying robust long-term water resources management strategies for California. Ph.D. Dissertation, Pardee RAND Graduate School, Santa Monica, CA, USA
- Groves DG and Lempert RJ (2007) A new analytic method for finding policy-relevant scenarios. *Global Environmental Change* 17:73–85
- Hall JW, Lempert RJ, Keller K, Hackbarth A, Mijere C, and McInerney DJ (2012) Robust climate policies under uncertainty: A comparison of robust decision making and info-gap methods. *Risk Analysis: An International Journal*. Wiley Online Library 32(10):1657–1672
- Hallegatte S (2009) Strategies to adapt to an uncertain climate change. *Global Environmental Change* 19(2):240–247
- Hallegatte S, Shah A, Lempert R, Brown C, and Gill S (2012) Investment decision making under deep uncertainty-application to climate change. The World Bank
- Hanak E (2011) Managing California's water: from conflict to reconciliation. Public Policy Instit. of CA
- Hashimoto T, Loucks DP, and Stedinger JR (1982) Reliability, resiliency, robustness, and vulnerability criteria for water resource systems. *Water Resources Research* RR-82-040, Reprinted from *Water Resources Research* 18 (1)

- Hjorth P and Madani K (2014) Sustainability monitoring and assessment: New challenges require new thinking. *Journal of Water Resources Planning and Management* 140(2):133–135
- Holling CS (1973) Resilience and stability of ecological systems. *Annual Review of Ecology and Systematics* 4(1):1–23
- Holling CS and Gunderson LH (2002) *Panarchy: Understanding transformations in human and natural systems*. Washington, DC: Island Press
- Husdal J (2008) Supply chain risk: The dark side of Supply Chain Management. Unpublished Guest Lecture, Molde University College, Retrieved February 28, 2009, from <http://husdal.com/2008/11/12/supply-chain-risk/>
- IPCC (2007) IPCC Fourth Assessment Report
- IPCC (2018) Global warming of 1.5°C. Report
- Islam S and Susskind L (2018) Using complexity science and negotiation theory to resolve boundary-crossing water issues. *Journal of Hydrology* 562:589–598
- Islam S and Susskind LE (2012) Water diplomacy: A negotiated approach to managing complex water networks. Routledge
- Janssen MA (2006) Historical institutional analysis of social-ecological systems. *Journal of Institutional Economics* 2(02):127
- Janssen MA, Anderies JM, and Ostrom E (2007) Robustness of social-ecological systems to spatial and temporal variability. *Society & Natural Resources* 20(4):307–322
- Kasprzyk JR, Nataraj S, Reed PM, and Lempert RJ (2013) Many objective robust decision making for complex environmental systems undergoing change. *Environmental Modelling & Software* 42:55–71
- Keefe R (2012) Reconsidering California transport policies: Reducing greenhouse gas emissions in an uncertain future. The Pardee RAND Graduate School
- Kitano H (2002) Systems biology: A brief overview. *American Association for the Advancement of Science* 295(5560):1662–1664
- Klein RJT, Nicholls RJ, and Thomalla F (2003) Resilience to natural hazards: How useful is this concept? *Global Environmental Change part B: Environmental Hazards*, Taylor & Francis 5(1):35–45
- Klijn F, Mens MJP, and Asselman N (2014) Robustness analysis for flood risk management planning: On risk-based decision making beyond simple economic reasoning, exemplified for the Meuse River (Netherlands). 6th International Conference on Flood Management (ICFM6), Sao Paulo, Brazil
- Kricheldorf HR (2016) *Getting it right in science and medicine*. Cham: Springer International Publishing
- Ku A (1995) *Modelling uncertainty in electricity capacity planning*. University of London 1995
- Kumar N, Poonia V, Gupta BB, and Goyal MK (2021) A novel framework for risk assessment and resilience of critical infrastructure towards climate change. *Technological Forecasting and Social Change* 165:120532
- Kundzewicz ZW (1999) Flood protection-sustainability issues. *Hydrological Sciences Journal*, Taylor & Francis 44(4):559–571
- Kwakkel JH, Haasnoot M, and Walker WE (2015) Developing dynamic adaptive policy pathways: a computer-assisted approach for developing adaptive strategies for a deeply uncertain world. *Climatic Change* 132(3):373–386
- Larijani KM (2005) Irans water crisis; inducers, challenges and counter-measures. Louvain-la-Neuve: European Regional Science Association (ERSA)
- Lempert RJ and Groves DG (2010) Identifying and evaluating robust adaptive policy responses to climate change for water management agencies in the American west. *Technological Forecasting and Social Change* 77(6):960–974
- Lempert RJ, Popper SW, and Bankes SC (2003) *Shaping the next one hundred years: New methods for quantitative, long-term policy analysis*. Rand, Santa Monica, CA
- Lempert RJ and Schlesinger ME (2000) Robust strategies for abating climate change. *Climatic Change* 45(3):387–401
- Lempert RJ, Schlesinger ME, and Bankes SC (1996) When we don't know the costs or the benefits: Adaptive strategies for abating climate change. *Climatic Change* 33(2):235–274
- Lempert RJ, Sriver RL, and Keller K (2012) Characterizing uncertain sea level rise projections to support investment decisions. California Energy Commission
- Levin SA and Lubchenco J (2008) Resilience, robustness, and marine ecosystem-based management. *Bioscience*, American Institute of Biological Sciences 58(1):27–32
- Liu J, Dietz T, Carpenter SR, Alberti M, Folke C, Moran E, Pell AN, Deadman P, Kratz T, Lubchenco J, ...

- Taylor WW (2007) Complexity of coupled human and natural systems. *Science* 317(5844):1513–1516
- Loonen RCGM, Trčka M, Cóstola D, and Hensen JLM (2013) Climate adaptive building shells: State-of-the-art and future challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 25:483–493
- Madani K (2014) Water management in Iran: What is causing the looming crisis? *Journal of Environmental Studies and Sciences* 4(4):315–328
- Madani K (2019) The value of extreme events: What doesn't exterminate your water system makes it more resilient. *Journal of Hydrology* 575:269–272
- Mandal U, Sena DR, Dhar A, Panda SN, Adhikary PP, and Mishra PK (2021) Assessment of climate change and its impact on hydrological regimes and biomass yield of a tropical river basin. *Ecological Indicators* 126:107646
- Martens C, Hickler T, Davis-Reddy C, Engelbrecht F, Higgins SI, Maltitz GP, Midgley GF, Pfeiffer M, and Scheiter S (2021) Large uncertainties in future biome changes in Africa call for flexible climate adaptation strategies. *Global Change Biology* 27(2):340–358
- Matalas NC and Fiering MB (1977) Water resources systems planning, *Climate, Climatic Change, and Water Supply*, 99--110. National Academy of Sciences, Washington, DC
- McConnell JB (2007) A life-cycle flexibility framework for designing, evaluating and managing" complex" real options: Case studies in urban transportation and aircraft systems. Citeseer
- McDonald J and Styles MC (2014) Legal strategies for adaptive management under climate change. *Journal of Environmental Law*. Oxford University Press 26(1):25–53
- McPhearson T, Andersson E, Elmqvist T, and Frantzeskaki N (2015) Resilience of and through urban ecosystem services. *Ecosystem Services* 12:152–156
- Mehryar S and Surminski S (2021) National laws for enhancing flood resilience in the context of climate change: Potential and shortcomings. *Climate Policy* 21(2):133–151
- Mengistu D, Bewket W, Dosio A, and Panitz H-J (2021) Climate change impacts on water resources in the Upper Blue Nile (Abay) River Basin, Ethiopia. *Journal of Hydrology* 592:125614
- Mens MJP (2015) System robustness analysis in support of flood and drought risk management. IOS Press
- Merchant C (2015) *Autonomous nature: Problems of prediction and control from ancient times to the scientific revolution*. Routledge
- Ming B, Liu P, Guo S, Cheng L, Zhou Y, Gao S, and Li H (2018) Robust hydroelectric unit commitment considering integration of large-scale photovoltaic power: A case study in China. *Applied Energy* 228:1341–1352
- Mycoo MA (2014) Autonomous household responses and urban governance capacity building for climate change adaptation: Georgetown, Guyana. *Urban Climate* 9:134–154
- Nelson DR, Adger WN, and Brown K (2007) Adaptation to environmental change: Contributions of a resilience framework. *Annual Review of Environment and Resources* 32(1):395–419
- Norizan NZA, Hassan N, and Yusoff MM (2021) Strengthening flood resilient development in Malaysia through integration of flood risk reduction measures in local plans. *Land Use Policy* 102:105178
- Norris FH, Stevens SP, Pfefferbaum B, Wyche KF, and Pfefferbaum RL (2008) Community resilience as a metaphor, theory, set of capacities, and strategy for disaster readiness. *American Journal of Community Psychology* 41(1–2):127–150
- Pahl-Wostl C (2007) Transitions towards adaptive management of water facing climate and global change. *Water Resources Management* 21(1):49–62
- Pahl Wostl C (2002) Towards sustainability in the water sector-The importance of human actors and processes of social learning. *Aquatic Sciences* 64(4):394–411
- Patel Center (2011) *Flexible design of urban water management systems* .
- Pham BT, Luu C, Dao D Van, Phong T Van, Nguyen HD, Le H Van, von Meding J, and Prakash I (2021) Flood risk assessment using deep learning integrated with multi-criteria decision analysis. *Knowledge-Based Systems* 219:106899
- Pielke RA (1998) Rethinking the role of adaptation in climate policy. *Global Environmental Change* 8(2):159–170
- Pradhanang SM and Jahan K (2021) Urban water security for sustainable cities in the context of climate change. *Water, Climate Change, and Sustainability*, Wiley 213–224
- Prutsch A, Grothmann T, Schauer I, Otto S, McCallum S, and others (2010) Guiding principles for adaptation to climate change in Europe. ETC/ACC technical paper 6:32

- Pundt H, Scheinert M, and Heilmann A (2021) Perspectives of climate change adaptation in organizations-A University'Example. *Universities, Sustainability and Society: Supporting the Implementation of the Sustainable Development Goals*. Springer Nature 323
- Reed PM and Kasprzyk J (2009) Water resources management: The myth, the wicked, and the future. *Journal of Water Resources Planning and Management, American Society of Civil Engineers (ASCE)* 135(6):411–413
- Refsgaard JC, Arnbjerg-Nielsen K, Drews M, Halsnæs K, Jeppesen E, Madsen H, Markandya A, Olesen JE, Porter JR, and Christensen JH (2013) The role of uncertainty in climate change adaptation strategies-A Danish water management example. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change* 18(3):337–359
- Reynolds JE, Halldin S, Seibert J, Xu CY, and Grabs T (2020) Robustness of flood-model calibration using single and multiple events. *Hydrological Sciences Journal* 65(5):842–853
- Ross AM and Rhodes DH (2015) Towards a prescriptive semantic basis for change-type ilities. *Procedia Computer Science* 44:443–453
- Ruhl JB (2010) General design principles for resilience and adaptive capacity in legal systems-with applications to climate change adaptation. *NCL Rev, HeinOnline* 89:1373
- Saleh JH, Hastings DE and Newman DJ (2003) Flexibility in system design and implications for aerospace systems. *Acta Astronautica* 53(12):927–944
- Sen MK, Dutta S, and Kabir G (2021) Flood resilience of housing infrastructure modeling and quantification using a bayesian belief network. *Sustainability* 13(3):1026
- Sivakumar B (2011) Water crisis: From conflict to cooperation-an overview. *Hydrological Sciences Journal* 56(4):531–552
- Smit B, Burton I, Klein RJT, and Wandel J (2000) An anatomy of adaptation to climate change and variability. *Societal Adaptation to Climate Variability and Change* 223–251
- Smit B and Pilifosova O (2001) Adaptation to climate change in the context of sustainable development and equity. *Climate Change 2001: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. IPCC Working Group II., Cambridge, UK: Cambridge Univ. Press, ed. JJ McCarthy, pp. 877–912
- Smit B and Wandel J (2006) Adaptation, adaptive capacity and vulnerability. *Global Environmental Change* 16(3):282–292
- Smith SJ, Wigley TML, Nakićenović N, and Raper SCB (2000) Climate implications of greenhouse gas emissions scenarios. *Technological Forecasting and Social Change* 65(2):195–204
- Spiller M, Vreeburg JHG, Leusbrock I, and Zeeman G (2015) Flexible design in water and wastewater engineering-Definitions literature and decision guide. *Journal of Environmental Management* 149:271–281
- Suttinon P and Nasu S (2010) Real options for increasing value in industrial water infrastructure. *Water Resources Management* 24(12):2881–2892
- Taguchi G, Chowdhury S, and Taguchi S (2000) *Robust Engineering*. McGraw-Hill Ryerson
- Thissen WAH and Walker WE (2013) *Public policy analysis*. Boston, MA: Springer US
- Timmerman JG, Pahl-Wostl C, and Möltgen J (2008) *The adaptiveness of IWRM: Analysing European IWRM Research*. IWA Publishing
- Tsui K-L (1992) An overview of Taguchi method and newly developed statistical methods for robust design. *IIE Transactions* 24(5):44–57
- Ullah F, Ali Shah SA, Saqib SE, Yaseen M, and Haider MS (2021) Households' flood vulnerability and adaptation: Empirical evidence from mountainous regions of Pakistan. *International Journal of Disaster Risk Reduction* 52:101967
- Ullman DG (2001) Robust decision-making for engineering design. *Journal of Engineering Design, Taylor & Francis* 12(1):3–13
- Van Der Brugge R, Rotmans J, and Loorbach D (2005) The transition in Dutch water management. *Regional Environmental Change* 5(4):164–176
- Van Riel W, Langeveld J, Herder P, and Clemens F (2015) Information use in Dutch sewer asset management. *Proceedings of the 7th world congress on Engineering Asset Management (WCEAM 2012)*, 615–624
- Wagener T, Sivapalan M, Troch PA, McGlynn BL, Harman CJ, Gupta H V, Kumar P, Rao PSC, Basu NB, and Wilson JS (2010) The future of hydrology: An evolving science for a changing world. *Water Resources Research* 46(5):1–10
- Walker B, Carpenter S, Anderies J, Abel N, Cumming G, Janssen M, Lebel L, Norberg J, Peterson GD, and Pritchard R (2002) Resilience management in social-

- ecological systems: A working hypothesis for a participatory approach. *Ecology and Society* 6(1):14
- Walker B, Holling CS, Carpenter SR, and Kinzig AP (2004) Resilience, adaptability and transformability in social-ecological systems. *Ecology and Society* 9(2):art5
- Walker WE, Haasnoot M, and Kwakkel J (2013a) Adapt or perish: A review of planning approaches for adaptation under deep uncertainty. *Sustainability* 5(3):955–979
- Walker WE, Lempert RJ, and Kwakkel JH (2013b) Deep uncertainty. *Encyclopedia of Operations Research and Management Science*, Boston, MA: Springer US, 395–402
- Walker WE, Marchau VAWJ, and Swanson D (2010) Addressing deep uncertainty using adaptive policies: Introduction to section 2. *Technological Forecasting and Social Change* 77(6):917–923
- Winterhalder B (1980) Environmental analysis in human evolution and adaptation research. *Human Ecology* 8(2):135–170
- Wong MK (2013) Flexible design: An innovative approach for planning water infrastructure systems under Uncertainty. Massachusetts Institute of Technology
- Young OR, Berkhout F, Gallopin GC, Janssen MA, Ostrom E, and van der Leeuw S (2006) The globalization of socio-ecological systems: An agenda for scientific research. *Global Environmental Change* 16(3):304–316
- Zhang N and Alipour A (2020) Multi-scale robustness model for highway networks under flood events. *Transportation Research Part D: Transport and Environment* 83:102281