2023, Vol.10, No.1, Pages 77 to 86
Journal of Water and Sustainable Development

سال دهم، شماره ۱، ۱۴۰۲، صفحات ۷۷ تا ۸۶
نشریه آب و توسعه پایدار

Article Type: Review Article

نوع مقاله: مروری

Groundwater-Drought Conjunctive Management: A review of California Experiences

N. Gazor Habibabadi[1*], H. Derakhshan[1]

1- PhD Student, Department of Water Science and Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.

*(Corresponding Author Email: najmegazor@gmail.com)

Received: 26-02-2023 Revised: 26-05-2023
Accepted: 31-05-2023 Available Online: 20-06-2023

مدیریت توأم آب زیرزمینی-خشکسالی: مروری بر تجارب کالیفرنیا

نجمه گازر حبیب آبادی[1*]، هاشم درخشان[1]

۱- دانشجوی دکترا، گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران.

*(نویسنده مسئول، E-Mail: najmegazor@gmail.com)

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۲/۰۷ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۰۳/۰۵
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۳/۱۰ تاریخ انتشار: ۱۴۰۲/۰۳/۳۱

Abstract

Iran is located in an arid and semi-arid region, where a large part of its water needs is provided by groundwater resources. In severe and prolonged periods of drought when it is not possible to supply water from surface water resources; Groundwater will be the only source of water supply. Not paying attention to demand management and not controlling over-harvesting during the drought period can further reduce the groundwater storage. Preventive strategies are necessary to reduce the effects of drought and protect groundwater. But unfortunately, most of the strategies to reduce the destructive effects of drought are passive (or reactive) and seek to supply water shortages from groundwater resources during the drought period, and attention to the active strategies of combined groundwater-drought management has been neglected. Therefore, due to the increase of severe and long-term droughts under climate change, it is necessary to pay attention to active strategies and new approaches. Demand management and harvesting reduction as a proactive approach can reserve groundwater in normal and wet years and increase drought resistance by preserving underground resources and ensure water supply security during severe droughts. This article is compiled in two parts in order to explain this approach. The first part describes the planning of related organizations for the combined management of drought and groundwater, and in the second part, the new approaches implemented in California as well as its application in Iran are explained.

Keywords: Drought Reserve, Water Supply, Groundwater, Climate Change, Resiliene.

چکیده

کشور ایران در منطقه‌ای خشک و نیمه‌خشک واقع شده، که بخش بزرگی از نیازهای آبی آن از منابع آب زیرزمینی تأمین می‌شود. در دوره‌های خشکسالی شدید و طولانی‌مدت که امکان تأمین آب از منابع آب سطحی وجود ندارد؛ آب زیرزمینی یگانه منبع تأمین آب خواهد بود. عدم توجه به مدیریت تقاضا و کنترل اضافه برداشت می‌تواند تنش آبی ایجاد شده را با کاهش ذخیره آب زیرزمینی تشدید نماید. لذا برای کاهش اثرات مخرب خشکسالی و حفاظت از آب زیرزمینی نیاز به استراتژیهای پیشگیرانه ضروری است. اما متأسفانه اکثر استراتژی‌های کاهش اثرات مخرب خشکسالی منفعلانه بوده و بر تأمین کمبود آب ایجاد شده در دوره خشکسالی، از منابع آب زیرزمینی تمرکز دارد و از توجه به مدیریت توأم آب زیرزمینی-خشکسالی غفلت شده است. باتوجه‌به اثر پدیده تغییراقلیم بر افزایش شدت و تواتر وقایع حدی که موجب افزایش احتمال وقوع خشکسالی‌های شدید و طولانی مدت می‌شود، ضروری است به استراتژی‌های فعال در این زمینه توجه ویژه شود. رزرو آب زیرزمینی در سال‌های نرمال و مرطوب، از طریق مدیریت تقاضا و کاهش برداشت، به‌عنوان رویکردی فعالانه می‌تواند علاوه‌بر حفظ آب زیرزمینی، مقاومت در برابر خشکسالی را افزایش داده و امنیت تأمین آب در طول خشکسالی‌های شدید را بهبود بخشد. این مقاله در راستای تشریح این رویکرد در دو بخش تدوین شده است. بخش اول به تشریح نحوه برنامه‌ریزی سازمان‌های مرتبط برای مدیریت توأم خشکسالی و آب زیرزمینی پرداخته و در بخش دوم سعی شده رویکردهای جدید در حال انجام در کالیفرنیا تبیین شده، و همچنین کاربرد آن در ایران تشریح شود.

واژه‌های کلیدی: رزرو خشکسالی، تأمین آب، آب زیرزمینی، تغییر اقلیم، تاب‌آوری.

HomePage: https://jwsd.um.ac.ir
How to cite this article: Gazor Habibabadi N. and Derakhshan H. 2023. Groundwater-Drought Conjunctive Management: A review of California Experiences. Journal of Water and Sustainable Development, 10(1): 77-86. doi: http://dx.doi.org/10.22067/jwsd.v10i1.2302-1219

مقدمه

آب زیرزمینی یک منبع حیاتی و ضروری برای میلیاردها نفر در سراسر جهان است. اهمیت این منبع حیاتی در مناطق خشک و نیمه‌خشک به دلیل دسترسی بسیار کم به منابع آب سطحی دوچندان است. لذا در صورت وقوع خشکسالی شدید و طولانی مدت (ابر خشکسالی)[1] که منابع آب سطحی به شدت کاهش یافته و از دسترس خارج می‌شوند آب زیرزمینی به یگانه منبع تأمین آب تبدیل خواهد شد (Langridge و Fencl، ۲۰۲۰). همچنین باتوجه‌به رشد سریع جمعیت اهمیت استراتژیک آب زیرزمینی برای امنیت جهانی آب و غذا، تحت تغییرات اقلیمی، تشدید خواهد شد. آب‌های زیرزمینی به‌عنوان تنها منبع دائمی آب شیرین در بسیاری از مناطق، برای امنیت تأمین آب بسیاری از جوامع، اهمیت حیاتی دارد (Taylor و همکاران، ۲۰۱۳؛ Cuthbert و همکاران، ۲۰۱۹). همچنین آب زیرزمینی یک منبع مهم برای مدیریت اثرات خشکسالی در طول تاریخ بوده است و این وابستگی با تغییر اقلیم افزایش یافته است (Green و همکاران، ۲۰۱۱). بنابراین مدیریت خشکسالی و مدیریت آب‌های زیرزمینی به شدت به یکدیگر وابسته بوده و باید به‌عنوان یک سیستم یکپارچه در نظر گرفته شوند (Petersen-Perlman و همکاران، ۲۰۲۲). اما متأسفانه امروزه در بسیاری از نقاط جهان به دلیل رویکرد عرضه محور در بخش آب نرخ پمپاژ آب‌های زیرزمینی از نرخ تغذیه طبیعی بیشتر شده و این منابع حیاتی دچار کاهش جبران‌ناپذیر ذخیره آبی شده است در شرایط کنونی که در دسترس بودن آب‌های سطحی به دلیل تغییر اقلیم تحت تأثیر قرار گرفته و افراد و بخش‌های بیشتری به آب‌های زیرزمینی به‌عنوان منبع تأمین آب متکی هستند و در عین حال، تغذیه آب‌های زیرزمینی کاهش یافته است و منابع محدودی برای استفاده مصرفی و برای اکوسیستم‌ها وجود دارد چگونگی تأثیر ابرخشکسالی‌های پیش‌بینی شده، تحت شرایط تغییر اقلیم بر ذخیره آب زیرزمینی و شیوه‌های مدیریتی برای بهبود پایایی آب‌های زیرزمینی تبدیل به مسئله‌ای مهم شده است (Langridge و Fencl، ۲۰۲۰). این مقاله در راستای تشریح مدیریت توأم خشکسالی و آب زیرزمینی برای رسیدن به دو هدف حفاظت از منابع آب زیرزمینی و کاهش اثرات مخرب خشکسالی تدوین شده است. برای این منظور ابتدا رویکرد عرضه محور و رویکرد تقاضا محور در بحث مدیریت منابع آب زیرزمینی به‌منظور در نظر گرفتن وضعیت کنونی منابع آبی و همچنین توجه به سرعت تجدیدپذیری آن‌ها و محدودیت‌های برداشت تشریح شد و در گام دوم از آنجایی‌که آب زیرزمینی در دوران خشکسالی منبعی مورد توجه برای تأمین آب خواهد بود به مفهوم رزرو خشکسالی[2] برای استفاده از آب زیرزمینی در زمان خشکسالی پرداخته شد. در نهایت به بیان جزئیاتی از انجام این نوع مدیریت پرداخته و مثال‌هایی موفق در این زمینه ارائه شده است.

مدیریت خشکسالی

خشکسالی یکی از پیچیده‌ترین مخاطرات طبیعی است که فراوانی و شدت این رخداد طبیعی تحت تأثیر تغییراقلیم در حال افزایش بوده و نقش حیاتی در برنامه‌ریزی و مدیریت منابع آب دارد و به‌منظور کاهش اثرات آن باید رویکردهای مدیریت ریسک مورد توجه قرار گیرد. تدوین طرح‌های ملی خشکسالی و اندازه‌گیری پایایی در اجرای طرح‌ها برای کاهش اثرات نامطلوب دوره‌های خشکسالی حیاتی است (Karadirek، ۲۰۲۲). روند جاری تغییر اقلیم (که بنابر مدل‌سازی‌های اخیر تا سال ۲۱۰۰ ادامه خواهد داشت)، موجب افزایش دما در اکثر مناطق ایران و به‌ویژه در مرکز و شرق کشور خواهد شد. افزایش دما در فصول زمستان و بهار بیشتر شده و موجب افزایش سهم تبخیر و تبخیرتعرق از بارش‌ها)و کاهش تجدیدپذیری منابع آب(می‌شود. توجه به این روند و برآورد اثر آن بر تجدیدپذیری منابع آب زیرزمینی، آشکار می‌سازد که اگر مدیریت آب‌های زیرزمینی بر همین منوال باشد، روند پیامدهای نامطلوب تشدید خواهند شد. علاوه‌براین، روند تغییر اقلیم منجر به تشدید رخدادهای فرین گشته و خواهد شد (داوری، ۱۴۰۰). برای انطباق با تغییرات جهانی اقلیم باید آب‌های زیرزمینی مدیریت محتاطانه‌ای -به‌عنوان یک منبع تجدیدپذیر با روند کند- داشته باشند. برای این منظور باید شدت و فراوانی دوره‌های خشک در آینده همراه با روند گرمایش در زمینه منابع آب زیرزمینی مورد توجه قرار گیرد (Green و همکاران، ۲۰۱۱). آمادگی یا برنامه‌ریزی برای کاهش اثرات خشکسالی به‌عنوان بخشی جدایی‌ناپذیر از سیاست خشکسالی، می‌تواند رویکردهای مختلفی داشته باشد. توجه به این نکته ضروری است که برنامه‌ریزی در سطوح چندگانه دولتی از محلی تا ملی انجام شود و اهداف این سیاست‌ها در سطوح محلی و منطقه‌ای باید منعکس‌کننده اهداف سیاست‌های ملی خشکسالی باشد و ضروری است ذی‌نفعان در همه سطوح برنامه‌ریزی تا اجرا مشارکت داشته باشند؛ لذا برای دریافت اثربخشی مناسب باید برنامه‌ریزی و اجرای طرح‌های مدیریت خشکسالی در مقیاس حوضه رودخانه رخ دهد. برنامه‌ریزی خشکسالی را می‌توان به‌عنوان اقداماتی که توسط شهروندان، صنعت، دولت و دیگران قبل از وقوع خشکسالی با هدف کاهش اثرات و درگیری‌های ناشی از خشکسالی انجام می‌شود، تعریف کرد (Wilhite و همکاران، ۲۰۱۴). جدول (۱) به تشریح مقایسه رویکردهای عرضه و تقاضا محور برای افزایش حفاظت از منابع آب زیرزمینی و کاهش تقاضای آب زیرزمینی پرداخته است.

۱- تبیین اقدامات منفعلانه و فعالانه در مدیریت خشکسالی

پیش‌بینی‌ها نشان می‌دهد طی قرن آینده، کاهش بارندگی‌های منطقه‌ای و گرم شدن گسترده تحت تاثیر تغییر اقلیم باعث افزایش شدت و تواتر خشکسالی در بسیاری از نقاط جهان می‌شود (Cook و همکاران، ۲۰۱۸). برای کاهش آسیب‌پذیری در مقابل

ابرخشکسالی‌های پیش‌رو، رویکرد مدیریت پیشگیرانه (ریسک) و توسعه استراتژی‌های بلندمدت برای تاب‌آوری در برابر ابرخشکسالی بسیار مهم و ضروری است. ولی معمولاً دستورالعمل‌های دولتی و استراتژی‌های سنتی سازگاری با خشکسالی، واکنشی انفعالی (مبتنی بر مدیریت بحران) داشته و پس از وقوع خشکسالی، طرح‌های اضطراری تهیه و اجرا می‌شوند. مشکل این رویکرد ارائه نکردن اقدامات پیشگیرانه بلندمدت برای کاهش آسیب‌پذیری در برابر کمبود آب ناشی از ورود به دوره خشکسالی است (Langridge و همکاران، ۲۰۱۲). معمولاً مدیریت با رویکرد انفعالی، شامل استراتژی‌های اضطراری و واکنشی و گاهاً غلط است که اغلب برای پاسخگویی به تقاضای آب در زمان خشکسالی به‌کار می‌روند (Petersen-Perlman و همکاران، ۲۰۲۲). در واکنش‌های انفعالی به پدیده خشکسالی، عملاً الگوی مصرف دستخوش تغییر نمی‌شود، بلکه تلاش می‌شود با تأمین منابع جدید (اگرچه به‌صورت موقت) همچون حفر چاه جدید و افزایش برداشت آب زیرزمینی در زمان عرضه آب مدیریت شود و کاستی‌های آن جبران شود (باقری، ۱۴۰۰). از آن‌جایی‌که این رویکرد مبتنی بر اجرای اقدامات پس از شروع دوره خشکسالی است، عموماً به دلیل زمان محدود برای انجام اقدامات، ناکارآمد بوده و بیشتر مبتنی بر اقدامات فوری مثل افزایش برداشت آب زیرزمینی در زمان خشکسالی در کنار اقدامات امدادی مانند کمک‌های نقدی دولت به کشاورزان برای جبران خسارت مالی در رابطه با فاجعه خشکسالی می‌باشد (karadirek، ۲۰۲۲). این اقدامات گاهاً تبعات جبران ناپذیری همچون سرعت بیشتری کاهش سطح آب سفره‌های زیرزمینی خواهد داشت بنابراین، برای کاهش آسیب‌ها در دوره خشکسالی نیاز به درک بیشتری از نحوه مدیریت مناسب خشکسالی و آب‌های زیرزمینی خواهد بود (Petersen-Perlman و همکاران، ۲۰۲۲).

در رویکرد فعالانه در بحث مدیریت خشکسالی، کاهش مصرف آب پاسخ اصلی به مدیریت ریسک در این زمینه خواهد بود و در مقابل، برای بهبود امنیت تأمین آب در طول خشکسالی ایجاد و نگهداری آب تحت عنوان رزرو خشکسالی محلی می‌تواند راه‌گشا باشد (Langridge و همکاران، ۲۰۱۲). شدت تأثیر خشکسالی به محیط هیدرولوژیکی منطقه و برنامه‌های قبلی انجام شده برای سازگاری با خشکسالی وابسته است. ایجاد رزرو خشکسالی و اختصاص حجم مشخصی از آب‌زیرزمینی که برای یک سطح معین از شدت خشکسالی قابل برداشت باشد در سال‌های مرطوب باعث می‌شود این آب در سال‌های خشک در دسترس باشد. بنابراین، ظرفیت رزرو زیاد می‌تواند تأثیر خشکسالی را تعدیل کند. آب زیرزمینی یکی از انواع شناخته شده مخازن است که می‌تواند رزرو تعیین شده را در خود جای دهند. هنگامیکه مقادیر زیادی آب زیرزمینی و سایر اشکال رزرو خشکسالی در دسترس باشد، اثرات خشکسالی را می‌توان تا حدودی کاهش داد. بااین‌وجود، در یک دوره خشکسالی طولانی مدت، نمی‌توان با برداشت از منابع آب رزرو شده نیاز آبی را به‌طور کامل برآورده کرد. بنابراین، مقداری کاهش تقاضا ضروری است (National Research Council، ۲۰۰۵).

جدول ۱- نمونه‌هایی از رویکردهای عرضه محور و رویکردهای تقاضا محور برای کاهش آسیب‌پذیری با مدیریت توأم آب زیرزمینی و خشکسالی (Langridge، ۲۰۱۸)

رویکردهای تقاضا محور	رویکردهای عرضه محور
• کاهش تقاضای آب برای آبیاری با تغییر الگوی کشت، ترکیب محصول، روش آبیاری و نوع کاشت (از مزرعه به گلخانه) • افزایش انگیزه برای کاهش تقاضای آب برای محوطه‌سازی و فضای سبز (ایجاد خشک منظر[۳] و چمن مصنوعی) • ایجاد سیستم مجوزدهی یا سایر محدودیت‌های نظارتی در مورد برداشت‌ها • گسترش استفاده از مشوق‌های اقتصادی (مانند اندازه‌گیری برداشت و قیمت‌گذاری) برای تشویق کاهش برداشت	• افزایش ظرفیت ذخیره‌سازی و رزرو آب با ساخت مخازن و سدها • نمک‌زدایی آب دریا • ذخیره‌سازی آب باران • حذف پوشش گیاهی مهاجم غیربومی • توسعه سیستم‌های ذخیره و بازیابی آبخوان با استفاده از تخلیه فاضلاب تصفیه شده • افزایش بازچرخانی آب • توسعه استراتژی‌هایی برای جلوگیری از هدررفتن آب‌های زیرزمینی در اثر آلودگی

۲- رزرو خشکسالی رویکردی فعالانه در مدیریت خشکسالی

خشکسالی همیشه خطری برای انسان و موجودات زنده بوده است. خشکسالی و تغییرات اقلیمی که گاهی اوقات با آن همراه می‌شود در از بین رفتن و سقوط تمدن‌ها نقش دارند و از نظر تاریخی، خشکسالی، تمدن‌ها و اکوسیستم‌های گوناگونی را نابود کرده است (Lund و همکاران، ۲۰۱۸). در مقابل آب زیرزمینی، به‌عنوان یک منبع اساسی و حیاتی برای میلیاردها نفر در سراسر جهان و به‌عنوان بزرگترین ذخیره آب شیرین توزیع شده در جهان، رزرو بسیار ارزشمندی در برابر تغییرات بارندگی و کمبود آب در طول خشکسالی است و نقش اصلی را در حفظ اکوسیستم‌ها و پاسخگویی به نیاز آب محیط‌زیستی و سازگاری انسان با تغییرات اقلیمی ایفا می‌کند (wendt و همکاران، ۲۰۲۱؛ FAO، ۲۰۱۶). در دهه‌های اخیر، افزایش استفاده از آب زیرزمینی منجر به کاهش آن‌ها در بخش‌های بزرگی از جهان شده است. بسیاری از منابع آب زیرزمینی در مقیاس‌های زمانی معنی‌دار برای جامعه انسانی و همچنین برای اکوسیستم تجدیدناپذیر هستند. تغییرات اقلیمی پیش‌بینی شده در بسیاری از نقاط جهان با کاهش

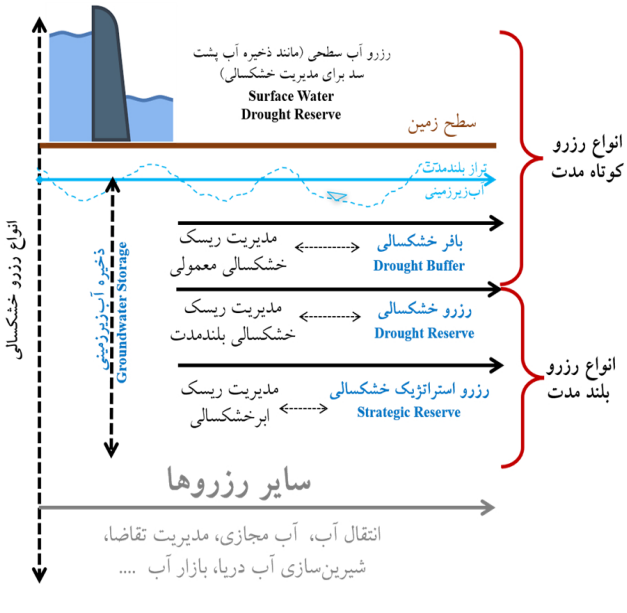
بارندگی و افزایش تبخیر و تعرق این نگرانی‌ها را تشدید می‌کند، که هر دو باعث کاهش تغذیه سفره زیرزمینی و همچنین افزایش نرخ برداشت از آب‌زیرزمینی می‌شوند (Kløve و همکاران، ۲۰۱۴). از طرفی افزایش استفاده از آب‌زیرزمینی ممکن است منجر به تشدید خشکسالی‌های جریان رودخانه شود (Wanders و Wada، ۲۰۱۵). از آنجایی‌که در طول خشکسالی، برای جبران کاهش در دسترس بودن آب سطحی، اضافه برداشت از آب‌های زیرزمینی صورت می‌گیرد و در عین حال در همان زمان بارش کمتر باعث کاهش تغذیه آب زیرزمینی می‌شود، این امر منجر به خشکسالی آب‌های زیرزمینی شده و سفره‌های آب زیرزمینی می‌توانند در طول زمان تخلیه شوند و توانایی ذاتی خود را برای استفاده به‌عنوان بافر در دوره‌های خشک از دست بدهند (Shivakoti و همکاران، ۲۰۱۹؛ Langridge و Daniels، ۲۰۱۷). سفره‌های زیرزمینی تنها در صورتی در برابر خشکسالی انعطاف‌پذیری ایجاد می‌کند که آب آن‌ها برای استفاده در خشکسالی اضطراری، رزرو شود (Langridge و Daniels، ۲۰۱۷). بنابراین با حفظ آب‌های زیرزمینی در سال‌های نرمال و مرطوب، کاهش اضافه برداشت و توسعه ذخایر، جوامع می‌توانند مقاومت خود را در برابر خشکسالی افزایش دهند. توسعه و نگهداری رزرو خشکسالی محلی می‌تواند امنیت تأمین آب در طول خشکسالی‌های شدید را بهبود بخشد. باتوجه‌به هزینه‌های اقتصادی، سیاسی و محیط‌زیستی ناشی از ذخیره‌سازی سطحی، افزایش رزرو آب زیرزمینی احتمالاً برای بسیاری از جوامع مناسب‌تر به‌نظر می‌رسد (Langridge و همکاران، ۲۰۱۲).

۳- ایجاد رزرو خشکسالی

ایجاد رزرو خشکسالی آب زیرزمینی مستلزم الزامات خاصی در هر مرحله از فرآیند رزرو است که شامل: شناسایی منبع آب برای رزرو، انتقال آب به محل رزرو، تغذیه مجدد در محل رزرو، برداشت آب رزرو شده و انتقال به استفاده کنندگان است. این مراحل مستلزم ملاحظات هیدروژئولوژیکی و الزامات قانونی است. دو نوع آب برای رزرو در دسترس است: آب‌های داخل و خارج از حوضه. آب زیرزمینی داخلی آبی است که از بارش محلی و جریان‌های سطحی درون حوضه به‌دست می‌آید و به آبخوانی که محل رزرو قرار دارد نفوذ می‌کند و با دو روش در آبخوان محل رزرو خشکسالی ذخیره می‌شود: ۱) کاهش تقاضا، که در آن آب‌بران از برداشت آب زیرزمینی در سال‌های نرمال و مرطوب خودداری می‌کنند و از آب‌های سطحی برای برآوردن تقاضا استفاده می‌کنند و ۲) تغذیه مجدد[۴] آبخوان به‌صورت مصنوعی. منظور از آب خارجی نیز آبی است که از یک منبع دیگر به حوضه انتقال داده می‌شود. مانند آب حاصل از بازچرخانی[۵] و آب شیرین‌سازی شده[۶] که تأسیسات تصفیه و یا نمک زدایی آن‌ها که خارج از حوضه بوده و از نظر هیدرولوژیکی با محل ذخیره‌سازی فاصله قابل توجهی دارد و یا آب وارداتی[۷] که از خارج از حوضه به حوضه انتقال داده می‌شود (Langridge و همکاران، ۲۰۱۲).

منابع آبی که می‌توان برای رزرو استفاده کرد شامل آب حاصل از کنترل سیل[۸] (رهاسازی آب حاصل از کنترل سیل در دشت‌ها جهت نفوذ به سفره‌های آب‌زیرزمینی)، آب شیرین‌سازی شده دریا، آب باران[۹]، رواناب رگبارها[۱۰] و آب بازچرخانی شده است؛ که هر منبع تابع طیف وسیعی از الزامات است و این الزامات باید سعی در ارزیابی و کاهش اثرات بالقوه محیط‌زیستی داشته باشد. همچنین باید به‌گونه‌ای باشد که این رزرو "بدون آسیب" به آب‌بران قانونی آب مورد استفاده برای رزرو باشد (Langridge و همکاران، ۲۰۱۲). برای تغذیه یک حوضه آب‌زیرزمینی، باید آن حوضه یا مناطقی از آن قابلیت تغذیه فیزیکی داشته باشد (California Department of Water Resources، ۲۰۰۹). نرخ تغذیه طبیعی هم از نظر مکانی و هم از نظر زمانی به دلیل تغییراتی مانند نوع خاک، پوشش گیاهی، شیب زمین و زمان و شدت بارندگی متفاوت است (Langridge و همکاران، ۲۰۱۲).

در این مقاله کلمه رزرو معادل کلمه Reserve به‌کار برده شده است که با کلمه Storage به معنای ذخیره بسیار متفاوت است. منظور از رزرو بخشی از آب ذخیره شده در منابع آبی است که باید برای منظور خاصی به‌عنوان مثال مدیریت ریسک خشکسالی کنار گذاشته شود و تا زمانیکه شرایط خشکسالی مورد نظر ایجاد نشود این آب برداشت نشده و مورد استفاده قرار نمی‌گیرد. مطابق شکل (۱) می‌توان رزرو خشکسالی را به دو دسته اصلی کوتاه مدت و بلند مدت تقسیم‌بندی نمود. رزرو کوتاه مدت برای خشکسالی‌های معمولی مورد کاربرد بوده و به دو نوع اصلی رزرو کوتاه مدت از ذخایر آب سطحی[۱۱] و رزرو کوتاه مدت از ذخایر آب‌زیرزمینی که از آن به بافر خشکسالی[۱۲] نیز یاد می‌شود تقسیم می‌شود. رزرو بلند مدت در آب‌زیرزمینی به دو نوع رزرو بلند مدت[۱۳] برای خشکسالی‌های بلندمدت و رزرو استراتژیک[۱۴] برای مدیریت ابرخشکسالی‌ها تقسیم می‌شود.



شکل ۱- انواع رزرو خشکسالی

استراتژی‌های مدیریت آب‌های زیرزمینی و تاب‌آوری در برابر خشکسالی

۱- مدیریت تقاضا: صرفه‌جویی و بهره‌وری مصرف آب از طریق مقررات و انگیزه‌های اقتصادی در نیم قرن گذشته، اغلب به‌عنوان یک استراتژی واکنشی برای مقابله با کمبود آب در طول خشکسالی ترویج شده است. البته این قوانین حفاظتی که در طول خشکسالی استفاده می‌شوند پس از پایان خشکسالی لغو می‌شوند (Langridge، ۲۰۱۸). این استراتژی‌ها معمولاً عبارتند از: تعدیل مجوزهای برداشت، ممنوعیت حفاری جدید برای استخراج آب، قیمت‌گذاری برق (تأثیرگذار بر هزینه‌های پمپاژ)، کمتر شدن سطح زیر کشت و هزینه‌های مازاد در صورت برداشت بیش از میزان تخصیص در پروانه. این قبیل استراتژی‌های مدیریت تقاضا رویکرد مهمی برای ایجاد پایداری حوضه بوده و می‌توان از آن‌ها برای کمک به ایجاد رزرو خشکسالی، استفاده کرد (Langridge و Van Schmidt، ۲۰۲۰)

۲- مدیریت تأمین: مدیریت تأمین به توسعه منابع آب جدید شامل آب وارداتی، آب بازچرخانی شده و آب شیرین‌سازی شده گفته می‌شود. درحالی‌که این منابع تأمین می‌توانند به تغذیه مجدد حوضه‌ها و انعطاف‌پذیری در برابر خشکسالی کمک کنند، هر یک محدودیت‌هایی نیز دارند. به‌عنوان‌مثال آب‌های سطحی وارداتی، به دلیل تغییرات اقلیمی و محدودیت‌های محیطی کمتر قابل اطمینان بوده و در ضمن نسبت به منابع دیگر گران‌تر هستند (Langridge و همکاران، ۲۰۱۲).

۳- تغذیه آبخانه‌ها: سه فرآیند اساسی می‌توانند سفره‌های زیرزمینی را دوباره احیا کنند: ۱) تغذیه طبیعی[۱۵]: هنگامی‌که آب از منابع آب سطحی به داخل سفره آب نفوذ می‌کند، تغذیه آبخوان به‌طور طبیعی اتفاق می‌افتد. تغذیه طبیعی در واقع بخشی از چرخه هیدرولوژیکی است که در نتیجه تراوش یا نفوذ آب به داخل آبخوان از منابع مختلف آب سطحی مثل نهرها، رودخانه‌ها، دریاچه‌ها، تأسیسات انتقال آب سطحی؛ و جریان برگشتی حاصل از کشاورزی فاریاب و بارندگی رخ دهد. ۲) تغذیه جایگزین[۱۶]: زمانیکه منابع آب دیگر، به‌جای استخراج آب‌های زیرزمینی جهت مصارف مختلف استفاده می‌شود و آب‌زیرزمینی استخراج نمی‌شود و یا کمتر استخراج می‌شود درواقع گفت نوعی تغذیه سفره آب زیرزمینی اتفاق افتاده که آن را تغذیه جایگزین می‌نامند. و ۳) تغذیه فعال[۱۷]: تغذیه سفره آب‌زیرزمینی به‌صورت مصنوعی که از طریق تغذیه مدیریت شده آبخوان در شرایط کنترل شده از راه پخش کردن آب در نهرها و حوض‌های مصنوعی شرایط نفوذ آب به داخل زمین را ایجاد می‌کند یا از طریق چاه‌های تزریقی، که در آن آب به‌طور مستقیم به زیر زمین تزریق می‌شود رخ دهد (Langridge و همکاران، ۲۰۱۲؛ California Department of Water Resources، ۲۰۰۹).

۴- تغذیه مصنوعی به کمک سیلاب: این استراتژی برای تغذیه مجدد سفره‌های زیرزمینی، توجه فزاینده‌ای را به‌عنوان رویکردی به خود جلب می‌کند که در آن جریان‌های سیل را می‌توان هم برای تغذیه مدیریت شده آبخوان (تغذیه فعال) و هم برای آبیاری به‌جای استفاده از آب زیرزمینی (تغذیه جایگزین) استفاده کرد (Langridge و همکاران، ۲۰۱۲).

۵- بانک آب‌های زیرزمینی، بازارهای آب و انتقال آب: بانک آب‌های زیرزمینی شامل ذخیره آب‌های سطحی در سفره‌های زیرزمینی در طول دوره‌های فراوانی برای استفاده در دوره‌های خشک‌تر است. که یک ابزار نسبتاً مقرون به‌صرفه برای افزایش عرضه آب در طول خشکسالی و جبران از دست دادن ذخیره فصلی است که در گذشته توسط سیستم‌های تغذیه شده با برف ایجاد شده است (Organisation for Economic Co-Operation and Development، ۲۰۱۷). انتقال آب عبارت است از انتقال حق استفاده از آب از یک بهره‌بردار به بهره‌بردار دیگر. بازارهای آب امکان انتقال موقت، بلندمدت یا دائمی حقوق استفاده از آب را در ازای دریافت هزینه فراهم می‌کند. از آن‌جایی‌که در سطح جهانی بیشترین حجم آب برای آبیاری استفاده می‌شود، آب اغلب توسط کشاورزان به کشاورزان دیگر با منابع آبی کم و محصولات با ارزش بالاتر، به شهرهای در حال رشد، و یا برنامه‌های محیط‌زیستی انتقال داده می‌شود و به‌صورت اجاره یا فروش به بازار عرضه می‌شود (Langridge و همکاران، ۲۰۱۲). بانک‌های بزرگ آب زیرزمینی که به‌عنوان واسطه‌ای در انتقال آب از یک مکان به مکان دیگر عمل می‌کنند، می‌توانند برای افزایش تاب‌آوری در برابر خشکسالی با رعایت برخی نکات مهم مورد استفاده قرار گیرند. این بانک‌ها به‌عنوان تأسیسات ذخیره‌سازی و رزرو، آب را در سال‌های مرطوب دریافت و ذخیره می‌کنند که متعاقباً می‌تواند در صورت نیاز برداشت و برای استفاده در مکان دیگر انتقال داده شود. باتوجه‌به کاهش قابلیت اطمینان آب وارداتی، بهتر است برای بانک آب‌های زیرزمینی بر استفاده از منابع آب منطقه‌ای و محلی تمرکز داشت تا جامعه قادر باشد رزرو خشکسالی را توسعه دهد(Langridge و همکاران، ۲۰۱۲). اما باید توجه نمود که پایش و اندازه‌گیری دقیق استفاده از آب‌های زیرزمینی پیش‌نیاز ایجاد یک بازار و بانک خوب است (Organisation for Economic Co-Operation and Development، ۲۰۱۷).

بررسی استراتژی ایجاد رزرو خشکسالی در کالیفرنیا

کالیفرنیا در سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۱ خشک‌ترین دوره ۲۲ ساله از حداقل ۸۰۰ سال قبل را سپری کرده است که ممکن است نشان دهنده افزایش ابرخشکسالی ناشی از گرمایش جهانی در آینده باشد (liu و همکاران، ۲۰۲۲). از سال ۲۰۱۰، برخی از مناطق این ایالت

شاهد کاهش نگران کننده در سطح آب‌های زیرزمینی با اثرات منفی از جمله فرونشست غیرقابل برگشت زمین و نفوذ آب دریا به سفره‌های آب زیرزمینی، کاهش جریان‌های سطحی و از دست دادن دائمی ظرفیت ذخیره آب به‌عنوان آب زیرزمینی مواجه شد (Langridge و Daniels، ۲۰۱۷). از سال ۲۰۱۲ تا ۲۰۱۶، کالیفرنیا یکی از عمیق‌ترین، طولانی‌ترین و گرم‌ترین خشکسالی‌های تاریخی خود را تجربه کرد. بسیاری از اثرات این خشکسالی بر جنگل‌ها، جمعیت ماهیان بومی، سطح آب‌های زیرزمینی و فرونشست زمین برای دهه‌ها باقی خواهد ماند (Lund و همکاران، ۲۰۱۸). فشار ناشی از خشکسالی بر منابع آب زیرزمینی تحت شرایط خشکسالی در این ایالت احتمالاً در دهه‌های آینده افزایش خواهد یافت و با نیاز به تأمین آب بیشتر و تولید غذای بیشتر برای جمعیت روبه‌رشد تشدید خواهد شد (liu و همکاران، ۲۰۲۲). هر خشکسالی بزرگ در تاریخ کالیفرنیا انگیزه بهبود در مدیریت آب بوده که اغلب به بررسی و چاره‌اندیشی برای مشکلات بلندمدت پرداخته شود. نوآوری‌ها در مدیریت آب در کالیفرنیا برای دوره‌های خشکسالی تا حد زیادی موثر بوده است (Lund و همکاران، ۲۰۱۸). در این بخش مروری کوتاه بر برنامه‌های کالیفرنیا به‌عنوان تجربه‌ای موفق خواهیم داشت.

در کالیفرنیا، هیچ سازمان ایالتی به تنهایی مسئولیت برنامه‌ریزی و کاهش اثرات خشکسالی را برعهده ندارد و اینکار با همکاری سازمان‌ها و نهادهای مختلف دولتی و مردمی و ذی‌نفعان مختلف انجام می‌شود. بخشی از فرآیند برنامه‌ریزی خشکسالی در کالیفرنیا به شرح زیر است:

• گنجاندن برنامه‌ها و پروژه‌های مرتبط با تأمین آب و همچنین تأثیرات تغییر اقلیم در برنامه‌های مدیریت یکپارچه آب منطقه‌ای.

• برنامه‌های مدیریت آب شهری، تأمین‌کنندگان آب شهری را ملزم می‌کند تا تحلیل‌های احتمالی کمبود آب را برای کاهش عرضه توسعه دهند و منابع کافی برای یک یا چند سال خشک (معمولاً یک خشکسالی ۳ ساله) را با درنظرگرفتن تغییر اقلیم در دسترس داشته باشند.

• برنامه‌های مدیریت آب کشاورزی باید شامل تجزیه و تحلیل اثرات بالقوه تغییر اقلیم بر منابع آبی آینده باشد.

برخی از مشکلات نیز برای برنامه‌ریزی خشکسالی در این ایالت وجود دارد از جمله:

• سخت شدن تقاضا در نتیجه اقدامات حفاظتی طولانی‌مدت مانند محدودیت‌های استفاده از آب یا تغییرات ساختار قیمت و دشواری کاهش بیش از حد مصرف آب را برای مصرف کنندگان در طول خشکسالی.

• برای اکثر شرکت‌های آب که درآمد خود را از مصرف آب دریافت می‌کنند، حفظ آب در دوره‌های غیرخشکسالی انگیزه منفی به حساب می‌آید.

• برنامه‌ریزی‌های موجود برای انجام رزرو خشکسالی منافع برخی مصرف کنندگان آب مانند صاحبان چاه‌های خصوصی و... را در نظر نگرفته است.

• هنوز برنامه مستدلی برای چگونگی استفاده از رزرو خشکسالی تدوین نشده است و برنامه‌ریزی‌ها در حال حاضر بیشتر بر افزایش میزان رزرو تمرکز دارند (Langridge، ۲۰۱۸).

۱- اقدامات انجام شده برای مدیریت خشکسالی و آب‌های زیرزمینی در کالیفرنیا

در کالیفرنیا برای مدیریت آبی در طول خشکسالی از مشوق‌های قیمت، صرفه‌جویی، بازچرخانی مجدد آب و انتقال آب برای مقابله با کاهش عرضه استفاده می‌شود (Langridge و همکاران، ۲۰۱۲)، اما همچنان در طول خشکسالی، پمپاژ آب‌زیرزمینی بخش قابل توجهی از جایگزینی آب ناشی از کمبود منابع آب سطحی را، تشکیل می‌دهد که این امر منجر به اضافه برداشت از آب‌های زیرزمینی و افت مستمر تراز آب زیرزمینی، تخلیه جریان، کاهش کیفیت آب و خشک شدن چاه‌ها، و همچنین خطرات محیط‌زیستی مانند فرونشست زمین در برخی سفره‌های زیرزمینی، نفوذ فاضلاب و نفوذ آب شور در سفره‌های زیرزمینی در امتداد ساحل شده است (liu و همکاران، ۲۰۲۲؛ Langridge و همکاران، ۲۰۱۲). برای مبارزه با این تهدیدات، کالیفرنیا قانون مدیریت پایدار آب زیرزمینی را در سال ۲۰۱۴ به تصویب رساند، و مناطقی مانند حوضه مرکزی و دیگر حوضه‌های آب زیرزمینی آن ملزم به توسعه و اجرای برنامه‌های مدیریتی برای دستیابی به سطوح پایدار پمپاژ و تغذیه آب زیرزمینی تا سال ۲۰۴۲ شد (liu و همکاران، ۲۰۲۲؛ Langridge و Van Schmidt، ۲۰۲۰؛ Langridge و همکاران، ۲۰۱۲). این قانون، مدیریت منابع آب را "برای خودکفایی منطقه‌ای در تأمین نیاز آبی با منابع محلی و انعطاف‌پذیری در برابر خشکسالی" ارتقا می‌دهد. بسیاری از حوضه‌های آب زیرزمینی کالیفرنیا قبل از وضع قانون مدیریت پایدار آب‌های زیرزمینی، ذخیره قابل توجهی را از دست داده بودند، که این موضوع در دسترس بودن آب زیرزمینی را برای استفاده به‌عنوان یک ذخیره استراتژیک در طول خشکسالی محدود می‌کرد (Langridge و Van Schmidt، ۲۰۲۰). طبق این قانون، مدیریت پایدار آب‌های زیرزمینی به‌عنوان "مدیریت و استفاده از آب‌های زیرزمینی به‌گونه‌ای که آب‌های زیرزمینی در طول افق برنامه‌ریزی و اجرا بدون ایجاد نتایج نامطلوب حفظ شود" تعریف می‌شود. این اثرات "نامطلوب" عبارتند از:

• کاهش مزمن سطح آب زیرزمینی؛ اما به استثنای کاهش سطح آب‌های زیرزمینی در طول خشکسالی اگر با افزایش سطح آب‌های زیرزمینی در دوره‌های دیگر جبران شود.

• کاهش قابل توجه و غیرمنطقی ذخیره آب زیرزمینی.

• نفوذ قابل توجه و غیرمنطقی آب دریا.

• تخریب قابل توجه و غیرمنطقی کیفیت آب.

• فرونشست زمین به صورت قابل توجه و غیرمنطقی.

• کاهش آب سطحی که اثرات نامطلوب قابل توجه و غیرمنطقی بر مصارف مفید دارد (Water Education Foundation، ۲۰۱۵).

برخی از استراتژی‌های مورد استفاده مناطق آب زیرزمینی ایالت کالیفرنیا برای سازگاری با خشکسالی از خشکسالی ۱۹۷۶ تکامل یافته است. در جدول (۲) روند مدیریت خشکسالی در کالیفرنیا آمده است که در صورت تداوم، می‌تواند به آمادگی بهتر این ایالت برای مقابله با خشکسالی‌های شدید آینده تحت تغییر اقلیم کمک کند (Langridge، ۲۰۱۸).

جدول ۲- روند تکامل مدیریت خشکسالی در کالیفرنیا (Langridge، ۲۰۱۸)

واقعه خشکسالی نوع اقدام	خشکسالی ۱۹۷۶	خشکسالی ۱۹۹۲-۱۹۸۷	خشکسالی ۲۰۰۹-۲۰۰۱	خشکسالی ۲۰۱۶-۲۰۱۱
حفاظتی	داوطلبانه	داوطلبانه	اجباری	حفاظت اجباری – کاهش ۲۵ درصدی برای مصرف شهری
ایجاد رزرو با آب بازچرخانی شده (میلیون مترمکعب)	۲۳۴/۴	۳۴۴/۱	۸۲۵/۲	۸۸۰/۷
اصلاح قانون	ظرفیت‌سازی برای مدیریت پایای آب زیرزمینی	مدیریت پایای آب زیرزمینی – طرح‌های داوطلبانه	ظرفیت‌سازی برای اجباری کردن طرح مدیریت پایای آب زیرزمینی	تصویب قانون مدیریت پایای آب زیرزمینی ۲۰۱۴ (SGMA) - الزامات اجباری
ایجاد رزرو خشکسالی	فرهنگ‌سازی برای مدیریت تقاضا و ایجاد رزرو خشکسالی	اولین رزرو محلی خشکسالی آب‌زیرزمینی در حوضه گلتا ایجاد شد	ایجاد رزرو خشکسالی توسط سایر استان‌های ایالت کالیفرنیا	در این دوره برای اولین بار مناطقی که رزرو خشکسالی داشتند از این ذخایر برای مدیریت خشکسالی استفاده کردند

از آن‌جایی‌که برنامه‌ریزی خشکسالی باید در مقیاس حوضه رودخانه رخ دهد در نواحی مختلف کالیفرنیا بسته به شرایط موجود اقدامات مختلفی در این زمینه صورت گرفته است. ناحیه آبی اورنج کانتی[18] دارای دو استراتژی قابل توجه است که می‌تواند تلفات ذخیره آب زیرزمینی را در طول زمان کاهش دهد و در نتیجه انعطاف‌پذیری در برابر خشکسالی را افزایش دهد:

۱) تحقیق و سپس مدیریت حوضه برای حفظ سطح آب‌های زیرزمینی در محدوده قابل قبولی که می‌تواند از کاهش غیرقابل جبران آب زیرزمینی در طول دوره‌های خشکسالی طولانی جلوگیری کند.

۲) برنامه‌های عمده برای افزایش تغذیه آب زیرزمینی با استفاده از آب بازچرخانی شده برای حفظ محدوده قابل قبول برای سطوح آب زیرزمینی.

اورنج کانتی مدیریت حوضه را با تأمین کامل آب مورد نیاز برای توسعه، بدون الزام کاهش مصرف آب انجام می‌دهد. در عوض، با افزایش ظرفیت خود برای تغذیه آب‌زیرزمینی با استفاده از چهار منبع جریان‌های پایه رودخانه سانتا آنا[19] و جریان‌های سیل، آب‌های سطحی وارداتی، و آب بازچرخانی شده، منابع آب موجود را به حداکثر می‌رساند. هدف آن‌ها استفاده از این منابع برای تغذیه مجدد حوضه آب زیرزمینی به اندازه کافی برای رفع نیازهای بهره‌برداران و در عین حال اجتناب از نفوذ آب دریا است.

در حوضه اصلی آب زیرزمینی سن گابریل[20] در اواسط دهه ۱۸۰۰، کشاورزی و دامداری اقتصادهای غالب بودند اما در حال حاضر بهره‌برداران شهری بیشترین میزان مصرف آب را دارند که تقریباً به‌طور کامل به حوضه آب زیرزمینی برای تأمین آب وابسته هستند. حوضه سن گابریل توسط منابع طبیعی محلی (بارش و رواناب از کوه‌های سن گابریل) و آب‌های سطحی وارداتی تصفیه نشده تغذیه می‌شود و تقاضای آب این منطقه با آب‌های زیرزمینی محلی، آب‌های سطحی محلی و وارداتی تصفیه شده و آب بازچرخانی شده برای مقاصد غیرشرب برآورده می‌شود. در این منطقه پمپاژ آب بیش از حق‌آبه مجاز بوده ولی کاربرانی که بیش از حق‌آبه مجاز خود پمپاژ می‌کنند، هزینه معادل جایگزین نمودن آب مازاد برداشت شده شامل جایگزینی این آب با پساب یا انتقال آب از حوزه دیگر را متحمل می‌شوند. در طول خشکسالی ۲۰۱۲-۲۰۱۶، به دلیل خشکسالی و بارندگی ناکافی تقریباً ۴۹۳/۴ میلیون مترمکعب از آب‌زیرزمینی، مازاد بر میزان تجدید برای رفع نیازهای آبی پمپ شد و جایگزینی آب زیرزمینی پمپاژ شده به دلیل کمبود بارندگی و در دسترس نبودن آب وارداتی قابل جبران نبود. پس از این دوره در این حوضه برای تاب‌آوری تحت خشکسالی‌های شدیدتر پیش‌بینی شده، تحت تغییر اقلیم تدابیر زیر اندیشیده شد:

۱) تعیین میزان برداشت مجاز از سفره آب‌زیرزمینی با در نظر گرفتن سطح پایین برای آبدهی مطمئن سفره: آبدهی مطمئن میزان آبدهی است که برداشت آن به سفره آسیب وارد نمی‌کند و برداشت

مجاز تعریف شده تحت مفهوم آبدهی مطمئن مقدار آبی است که می‌توان بدون پرداخت هزینه مازاد استخراج کرد. این موضوع انگیزه کاهش پمپاژ آب زیرزمینی را برای پاسخگویی به تقاضا ایجاد می‌کند، زیرا هر آبی که بیش از حد مجاز پمپ شود، کاربران را ملزم به پرداخت هزینه‌ای برای تغذیه مجدد می‌کند. این استراتژی همچنین می‌تواند بودجه خرید آب‌های سطحی وارداتی تصفیه نشده را برای تغذیه مجدد افزایش دهد.

۲) شکل‌گیری ارزیابی توسعه منابع. ایجاد برنامه‌های استفاده از سیل برای کمک به مدیریت منابع آب حوضه اصلی تحت شرایط خشکسالی در "بدترین حالت" (بدترین حالت در نظر گرفته شده، شرایط خشکسالی مشابه خشکسالی ۲۰۱۲-۲۰۱۶ با مدت ۱۵ سال تعریف شده است). هدف خرید ۱۲۳/۴ میلیون مترمکعب آب در مدت ده سال و ذخیره آن برای نیازهای آینده است (Langridge، ۲۰۱۸).

در حوضه آب زیرزمینی تیهوچاپی[۲۱] که یک منطقه روستایی بوده و کاربری زمین عمدتاً کشاورزی است استفاده کنندگان آب زیرزمینی شامل بخش کشاورزی، تأمین‌کنندگان آب[۲۲]، شرکت‌های مشترک آب[۲۳]، تأسیسات صنعتی و انجمن‌های آب‌بران هستند که آب‌زیرزمینی را پمپاژ می‌کنند. همچنین تأمین‌کنندگان آب در این منطقه برای مصارف خانگی کاملاً به آب‌های زیرزمینی وابسته هستند. این منطقه دارای امکانات تغذیه آب‌های زیرزمینی است و سیاست حفاظتی جامع آن امکان تزریق مقداری از آب‌های سطحی وارداتی را به‌عنوان رزرو خشکسالی فراهم می‌کند. در سال ۲۰۱۱، تأمین‌کنندگان آب ملزم به ایجاد یک منبع رزرو آب ۵ ساله در حوضه شدند که برابر با نیاز آبی وارداتی ۵ ساله است تا به‌عنوان رزرو خشکسالی عمل کند. حداکثر فرصت ایجاد این رزرو یک دوره ۱۰ ساله است. در طول خشکسالی ۲۰۱۱-۲۰۱۶، آب‌بران توانستند از این آب رزرو شده استفاده کنند. البته مصرف‌کنندگان بخش کشاورزی ملزم به انجام این رزرو نیستند، اما در عوض از سیاست کاهش هزینه پمپاژ آب برای انگیزه آب‌بران این بخش استفاده می‌شود.

در منطقه آبی گلتا[۲۴] مدیریت حوضه آب زیرزمینی گلتا، با رزرو خشکسالی آب زیرزمینی که در سال ۱۹۹۱ تأسیس شد، در خط مقدم مدیریت پیشگیرانه خشکسالی بوده است. در خشکسالی شدید سال‌های ۲۰۱۲-۲۰۱۶ که تا سال ۲۰۱۸ برای نواحی ساحلی این منطقه ادامه داشت رزرو خشکسالی آب‌های زیرزمینی بافر مهمی برای رفع نیازهای آبی بود. تنها ۱۵ درصد از منابع آبی این منطقه را آب زیرزمینی تشکیل می‌دهند، اما در طول خشکسالی ۲۰۱۲-۲۰۱۶ که منابع آب سطحی در دسترس کاهش یافت آب‌های زیرزمینی منبع اصلی تأمین آب این منطقه بود. در سال ۲۰۱۷ که افزایش دسترسی به آب‌های سطحی ایجاد شد برای تغذیه مجدد حوضه آب زیرزمینی و بازیابی سطح آب‌های زیرزمینی اقدام شد، و همچنان محدودیت‌های اجباری خشکسالی به قوت خود باقی است. طبق قوانین این منطقه آب وارداتی به منطقه در ابتدا برای پرکردن حوضه و ایجاد یک رزرو خشکسالی استفاده می‌شود و در زمانی‌که خشکسالی منطقه‌ای منجر به کاهش میزان آب سطحی در منطقه شود این رزرو می‌تواند برای تحویل به مشتریان فعلی استفاده شود. هنگامی‌که سطح آب زیرزمینی حوضه به سطوح مطمئن بازیابی شود و تمام تعهدات دیگر برای تحویل آب برآورده شود، منطقه آبی گلتا می‌تواند مجدداً تا یک درصد از کل عرضه آب شرب خدمات جدیدی را ارائه دهد. اما، درصورت اتصال یک سرویس جدید به سیستم آبرسانی، تعهد رزرو سالانه برای خشکسالی، باید متناسب با افزایش میزان عرضه‌ای که صورت گرفته است افزایش یابد. به‌طوری‌که منابع آب سالم در مواقع خشکسالی با هر تقاضای جدید یا اضافی به خطر نیفتد (Langridge و همکاران، ۲۰۱۸). البته آژانس‌ها و کاربرانی که در کالیفرنیا مایل به تغذیه مجدد و بازیابی آب‌های زیرزمینی هستند، این مسئولیت را برعهده دارند که ثابت کنند اینکار بر سایر "آب‌بران قانونی" حوضه آب زیرزمینی تأثیر منفی نمی‌گذارد و آسیبی وارد نمی‌کند (Langridge و همکاران، ۲۰۱۲).

۲- محدودیت‌های استراتژی ایجاد رزرو خشکسالی

درحالی‌که ایجاد رزرو خشکسالی به‌عنوان یک رویکرد مهم و پیشگیرانه برای افزایش انعطاف‌پذیری در برابر خشکسالی است اما توجه به این نکته مهم است که این استراتژی در برخی از حوضه‌ها امکان‌پذیر نبوده و در اولویت نیست. تجزیه و تحلیل مدل آب‌وهوای جهانی نشان می‌دهد در آینده زمستان‌های بسیار مرطوب نیز خواهیم داشت. بنابراین، برای برخی از حوضه‌های آب‌زیرزمینی احتمالاً تأثیر تغییر اقلیم، باعث فراوانی بیشتر سیل خواهد شد و اولویت مدیریت برای حوضه کنترل آن خواهد بود. علاوه‌براین، هر حوضه‌ای توانایی ذخیره آب‌های زیرزمینی را به‌صورت محلی به‌عنوان یک رزرو خشکسالی ندارد. به‌عنوان مثال شش حوضه[۲۵] در کالیفرنیا گروهی از حوضه‌های آب‌زیرزمینی مجاور هستند که یک حوضه آب‌زیرزمینی نسبتاً کوچک است وفضای کافی برای رزرو مقادیر زیادی آب در طول سال‌های مرطوب برای استفاده در سال‌های خشک را ندارد. همچنین، توزیع نابرابر امکانات تغذیه در این حوضه وجود دارد و در کنار شرایط خاص هیدروژئولوژیک و حقوق پیچیده آب در حوضه، ظرفیت رزرو آب برای مدت طولانی محدود است. همچنین وقوع حوادث سیل‌های شدیدتر تحت تغییر اقلیم، ناتوانی حوضه را در جذب حداکثر مقدار رواناب سیل تشدید می‌کند. بنابراین در برخی حوضه‌ها، استراتژی‌های کنترل دقیق تقاضا در همه زمان‌ها احتمالاً تنها پاسخ سازگاری با خشکسالی است. به‌عنوان‌مثال در آبخوان کوچک در ساحل شمالی کالیفرنیا، مندوسینو هدلندز[۲۶] باتوجه‌به بافت زمین در این حوزه، هر ساله بیشتر آب‌های زیرزمینی از طریق چشمه‌ها به‌صورت فصلی به اقیانوس آرام جریان می‌یابد و امکان رزرو ندارد (Langridge، ۲۰۱۸).

نتیجه‌گیری و جهت‌گیری‌های آینده

باوجود نقش آب‌زیرزمینی به‌عنوان منبع تأمین حیاتی و مهمتر از آن داشتن نقش پشتیبان در طول خشکسالی، برنامه‌ریزی خشکسالی و برنامه‌های مدیریت آب‌های زیرزمینی به‌ندرت با یکدیگر تلاقی می‌کنند. معمولاً طرح‌های خشکسالی توجه محدودی به حفظ آب‌زیرزمینی در بلندمدت دارند و همچنین برنامه‌های آب زیرزمینی توجه محدودی به خشکسالی‌های پیش‌رو در آینده دارند.

در ایران مدیریت خشکسالی هیچ ارتباطی با مدیریت تقاضا ندارد و همواره تلاش شده با تأمین نیاز آبی از منابع مختلف به‌خصوص آب‌های زیرزمینی در هر صورت برای تقاضاهای موجود، عرضه صورت گیرد و همین امر تاکنون منجر به تخلیه بیش از میزان تجدیدپذیری بسیاری از سفره‌های آب زیرزمینی تقریباً در تمامی نقاط کشور گشته و آسیب‌های جبران ناپذیری همچون از دست‌دادن ذخایر ارزشمند آب‌های زیرزمینی و همچنین فرونشست زمین را به همراه داشته است. برای مدیریت توأم خشکسالی و آب‌های زیرزمینی انجام مدیریت تقاضا و کاهش مصرف اصلی‌ترین راه‌حل است. در وضعیت کنونی سفره‌های آب‌زیرزمینی در ایران ابتدا باید با بازیابی سطح آبخوان‌ها حیات این منابع ارزشمند را تضمین نمود. سپس با تغییر مسیر مدیریت منابع آبی، از مدیریت عرضه به مدیریت تقاضا به سمت رزرو خشکسالی حرکت کرد. رزرو خشکسالی، ایجاد ذخیره استراتژیک آب زیرزمینی با یک رویکرد پیشگیرانه جایگزین است که می‌تواند با افزایش عرضه در زمان خشکسالی، آسیب‌پذیری در برابر خشکسالی را کاهش دهد و همچنین با کاهش نرخ افت سطح آب زیرزمینی، با ایجاد تعادل هیدرولوژیکی حوضه‌های آب‌زیرزمینی در زمان خشکسالی منجر به حفظ ذخیره استراتژیک آب زیرزمینی می‌شود. این رزرو برای حفظ سرمایه طبیعت برای خشکسالی طولانی‌مدت اجتناب‌ناپذیر، بسیار مهم بوده و فقط در یک دوره خشک طولانی مدت قابل برداشت و استفاده خواهد بود. این رویکرد شبیه به ذخیره پول در حساب بانکی برای مواقع اضطراری است. این رویکرد در ابتدا قطعاً دشواری و پیچیدگی‌هایی به همراه خواهد داشت و بدون داشتن برنامه منسجم و همراهی تمام ذی‌نفعان و سازمان‌های مرتبط در رده‌های مختلف موفقیتی حاصل نخواهد شد.

سپاسگزاری

از جناب آقای دکتر کامران داوری برای ارائه ایده اولیه این مقاله و راهنمایی‌های ایشان در نگارش مقاله سپاسگزاری می‌نماییم.

پی‌نوشت

1-Mega-drought

2-Drought Reserve:
بخشی از منابع آبی که طبق توافق و برنامه‌ریزی‌های انجام شده در زمینه مدیریت منابع آبی تنها در صورت بروز خشکسالی تعریف شده قابل برداشت و استفاده خواهد بود.

3-Xeriscape
محوطه‌سازی و ایجاد فضای سبزی با کیفیت که همراه با صرفه‌جویی آب و محافظت از محیط‌زیست می‌باشد. اصطلاح Xeriscape اولین بار در ایالت کلرادو در دهه ۱۹۸۰ در پاسخ به خشکسالی‌های طولانی مدت مطرح شد. که متشکل از واژه یونانی xero به معنی خشکی و landscape به معنی چشم‌انداز است.

4-Recharge 5-Recycled Water
6-Desalinated Water 7-Imported Water
8-Flood Control Releases 9-Captured Rainwater
10-Storm Water 11-Surface Water Drought Reserve
12-Drought Buffer 13-Drought Reserve
14-Strategic Reserve 15-Natural Recharge
16-In-lieu Recharge 17-Active Recharge
18-Orange County 19-Santa Ana
20-San Gabriel 21-Tehachapi
22-Water Purveyors
یک تأمین‌کننده آب، مسئولیت تأمین و انتقال آب به اماکن مسکونی و تجاری را دارد.
23-Mutual Water Companies 24-Goleta
25-Six Basins 26-Mendocino Haedlands

منابع

باقری، ع. ۱۴۰۰. سازگاری: کم‌آبی یا زیادی مصرف؟. نشریه آب و توسعه پایدار، ۸(۱): أ.

داوری، ک. ۱۴۰۰. تشدید رخدادهای فرین و کاهش احتمالی تجدیدپذیری آب‌های زیرزمینی در ایران. نشریه آب و توسعه پایدار، ۸(۴): ۱۲۱-۱۲۵.

Cuthbert MO., Gleeson T., Moosdorf N., Befus, KM., Schneider A., Hartmann J. and Lehner B. 2019. Global patterns and dynamics of climate–groundwater interactions. Nature Climate Change, 9(2): 137-141. 10.1038/s41558-018-0386-4

Cook BI., Mankin JS. and Anchukaitis KJ. 2018. Climate change and drought: From past to future. Current Climate Change Reports, 4:164–179. 10.1007/s40641-018-0093-2

DWR (California Department of Water Resources). 2009. California Water Plan Update 2009: Public Review Draft

National Research Council. 2005. Water conservation, reuse, and recycling: proceedings of an Iranian-American workshop. Washington, DC: National Academies Press. 10.17226/11241

Organisation for Economic Co-Operation and Development (OECD). 2017. Groundwater Allocation: Managing Growing Pressures on Quantity and Quality. IWA Publishing. London, England, United Kingdom. 10.2166/9781780409412

Petersen-Perlman JD., Aguilar-Barajas I. and Megdal S.B. 2022. Drought and Groundwater Management: Interconnections, challenges, and policy responses. Current Opinion in Environmental Science & Health: 100364, 28: 100364. 10.1016/j.coesh.2022.100364

Shivakoti B., Villholth KG., Pavelic P. and Ross A. 2019. Strategic use of groundwater-based solutions for drought risk reduction and climate resilience in Asia and beyond. Contributing Paper to Global Assessment Report on Disaster Risk Reduction (GAR 2019). United Nations Office for Disaster Risk Reduction. Geneva, Switzerland

Taylor RG., Scanlon B., Döll P., Rodell M., Van Beek R., Wada Y., Longuevergne L., Leblanc M., Famiglietti JS., Edmunds M. and Konikow L. 2013. Ground water and climate change. Nature climate change, 3(4): 322-329. 10.1038/nclimate1744

Wanders N. and Wada Y., 2015. Human and climate impacts on the 21st century hydrological drought. Journal of Hydrology, 526: 208-220. 10.1016/j.jhydrol.2014.10.047

Wendt D.E., Bloomfield JP., Van Loon AF., Garcia M., Heudorfer B., Larsen J. and Hanna, DM. 2021. Evaluating integrated water management strategies to inform hydrological drought mitigation. Natural Hazards and Earth System Sciences, 21(10): 3113-3139. 10.5194/nhess-21-3113-2021

Water Education Foundation, 2015. The 2014 Sustainable Groundwater Management Act: A Handbook to Understanding and Implementing the Law. Published by Water Education Foundation. California.

Wilhite DA., Sivakumar MV. and Pulwarty R. 2014. Managing drought risk in a changing climate: The role of national drought policy. Weather and climate extremes, 3: 4-13. 10.1016/j.wace.2014.01.002

–Chapter 8– Conjunctive Management and Groundwater Storage. Department of Water Resources. California Natural Resources Agency. State of California.

FAO. 2016. Global Diagnostic on Groundwater Governance. Rome, Italy: FAO.

Green TR., Taniguchi M., Kooi H., Gurdak JJ., Allen DM., Hiscock KM., Treidel H. and Aureli A. 2011. Beneath the surface of global change: Impacts of climate change on groundwater. Journal of Hydrology, 405(3-4): 532-560. 10.1016/j.jhydrol.2011.05.002

Karadirek IE., 2022. Drought Management. In Water and Wastewater Management Cham: Springer International Publishing: 27-34. 10.1007/978-3-030-95288-4_3

Kløve B., Ala-Aho P., Bertrand G., Gurdak JJ., Kupfersberger H., Kværner J., Muotka T., Mykrä H., Preda E., Rossi P. and Uvo CB. 2014. Climate change impacts on groundwater and dependent ecosystems. Journal of Hydrology, 518: 250-266. 10.1016/j.jhydrol.2013.06.037

Langridge R., Fisher A., Racz A., Daniels B., Rudestam K. and Hihara B. 2012. Climate change and water supply security: reconfiguring groundwater management to reduce drought vulnerability.

Langridge R. and Daniels B. 2017. Accounting for climate change and drought in implementing sustainable groundwater management. Water Resources Management, 31(11): 3287-3298. 10.1007/s11269-017-1607-8

Langridge R. 2018. Management of Groundwater and Drought Under Climate Change. Callifornia's Fourth Climate Assessment, 10(x): 1-54.

Langridge R. and Fencl A. 2020. Implications of climate change to groundwater. Encyclopedia of the World's Biomes: 438-453. 10.1016/B978-0-12-409548-9.12021-4

Langridge R. and Van Schmidt N.D. 2020. Groundwater and drought resilience in the SGMA era. Society & Natural Resources, 33(12): 1530-1541. 10.1080/08941920.2020.1801923

Liu PW., Famiglietti J., Purdy A., Kim K., McEvoy A., Reager J., Bindlish R., Wiese D., David C. and Rodell M. 2022. Groundwater Depletion in California's Central Valley Accelerates During Megadrought. Nature Communications, 13(1): 7825. 10.1038/s41467-022-35582-x

Lund J., Medellin-Azuara J., Durand J. and Stone K. 2018. Lessons from California's 2012–2016 drought. Journal of Water Resources Planning and Management, 144(10): 04018067. 10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000984