"نشریه علوم زراعی ایران"
جلد بیست و یکم، شماره ۳، پاییز ۱۳۹۸

مقاله پژوهشی

ارزیابی وضعیت بهره‌وری و شاخص نسبت عرضه به تقاضای آب در چغندرقند (*Beta vulgaris* L.) با استفاده از مدل‌های شبیه‌سازی رشد در استان خراسان رضوی

Assessment of water productivity and supply: demand ratio index in sugar beet (*Beta vulgaris* L.) in Khorasan Razavi province, Iran using growth simulation models

اسماعیل محمدی احمد- محمودی[۱]، رضا دیهیم فرد[۲] و امید نوری[۳]

چکیده

محمدی احمد- محمودی، ا.، ر. دیهیم فرد و ا. نوری. ۱۳۹۸. ارزیابی وضعیت بهره‌وری و شاخص نسبت عرضه به تقاضای آب در چغندرقند (*Beta vulgaris* L.) با استفاده از مدل‌های شبیه‌سازی رشد در استان خراسان رضوی. **نشریه علوم زراعی ایران. ۲۱(۳): ۲۸۶-۲۶۸.**

با توجه به افزایش سریع جمعیت و نیاز به تولید بیشتر محصولات کشاورزی، توجه به موضوع کم‌آبی و افزایش بهره‌وری آب اهمیت بیشتری پیدا کرده است. به‌این منظور آزمایشی با استفاده از مدل شبیه‌سازی SUCROS، داده‌های بلندمدت اقلیمی (۱۳٦٤ تا ۱۳۹٤) و جمع‌آوری پرسشنامه از کشاورزان، جهت ارزیابی بهره‌وری آب در نظام‌های کشت چغندرقند در ۱۰ شهرستان استان خراسان رضوی و ارزیابی نقش مدیریت در بهره‌وری آب و وقوع تنش خشکی اجرا شد. نتایج شبیه‌سازی‌های بلندمدت نشان داد عملکرد واقعی کشاورزان (۳۳/۵ تن در هکتار) تنها یک‌سوم عملکرد قابل‌دستیابی (۹۷/۳ تن در هکتار) چغندرقند در مناطق مورد بررسی بود که ٤۸ درصد از این خلاء عملکرد به‌دلیل محدودیت آب بود. نتایج نشان داد که بهره‌وری پایین آب آبیاری (۱/۸ تا ۳/۱۵ کیلوگرم بر مترمکعب) در مناطق مورد بررسی بود. بر اساس نتایج به‌دست آمده، عدم مدیریت صحیح آبیاری، به‌رغم مصرف بالای آب در برخی از شهرستان‌ها باعث کاهش بهره‌وری مصرف آب و وقوع تنش خشکی در طول فصل رشد گردید. نتایج نشان داد که بین بهره‌وری آب و شاخص عرضه به تقاضای آب در شهرستان‌های استان ارتباط مثبت و معنی‌داری وجود داشت. با توجه به نتایج این تحقیق، وضعیت این شاخص در طول فصل رشد تحت تاثیر مدیریت آبیاری، دمای هوا (به‌ویژه در ماه‌های گرم سال) و ظرفیت نگهداری آب خاک در هر شهرستان متغیر بود. این نتایج نشان دهنده ضرورت رعایت زمان‌بندی صحیح آبیاری بر اساس نیاز گیاه و ظرفیت نگهداری آب خاک در طول فصول گرم جهت تامین نیاز رطوبتی گیاه چغندرقند است.

واژه‌های کلیدی: خلاء عملکرد، چغندر قند، زمان‌بندی آبیاری و مدل شبیه‌سازی SUCROS

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۱۰/۰۳ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۴/۲۶ این مقاله مستخرج از رساله دکتری نگارنده اول می‌باشد.

۱- دانشجوی دکتری پژوهشکده علوم محیطی دانشگاه شهید بهشتی، تهران
۲- استادیار پژوهشکده علوم محیطی دانشگاه شهید بهشتی، تهران (مکاتبه کننده) (پست الکترونیک: deihimfard@gmail.com, deihim@sbu.ac.ir)
۳- استادیار پژوهشکده علوم محیطی دانشگاه شهید بهشتی، تهران

مقدمه

بخش کشاورزی بزرگترین مصرف کننده منابع آبی قابل دسترس است، به طوری که حدود ۷۰ درصد از منابع آبی شیرین در کره زمین جهت آبیاری محصولات کشاورزی مصرف می‌شود (Sahin *et al.*, 2014). به همین دلیل سازمان خواربار و کشاورزی ملل متحد آب را منبع اصلی امنیت غذایی معرفی کرده است. در حال حاضر ۲۶ کشور در کره زمین دچار کمبود شدید آب هستند که بخش عمده آنها در آفریقا و خاورمیانه قرار دارند (Keshavarz and and Dehghani Sanij, 2011). کشور ایران نیز در خاورمیانه یکی از کشورهایی است که کم‌آبی در آن به یک معضل تبدیل شده است (Alizadeh and Keshavarz, 2005). تعداد زیادی از استان‌های کشور با کم آبی مواجه هستند که استان خراسان رضوی با متوسط بارندگی سالیانه ۲۱۰ میلی‌متر نیز از این قاعده مستثنی نیست. از بین ۳۷ دشت استان خراسان رضوی ۱۲ دشت ممنوعه بحرانی، ۲۲ دشت ممنوعه عادی و تنها سه دشت آزاد جهت برداشت آب گزارش شده‌اند (Rahnama and Shaddel, 2015). با توجه به افزایش سریع جمعیت و نیاز به تولیدات بیشتر محصولات کشاورزی و به‌دنبال آن افزایش فشار بر منابع آبی جهت تامین امنیت غذایی، بحران کم‌آبی در آینده اهمیت بیشتری پیدا خواهد کرد (FAO, 2012).

چغندرقند یکی از دو گیاه زراعی اصلی برای تولید شکر است. با توجه به مصرف بالای شکر در ایران (هفت کیلوگرم بالاتر از سرانه مصرف جهانی شکر) و همچنین عدم امکان کشت نیشکر در اغلب مناطق کشور، توجه به کشت چغندرقند جهت تامین نیاز شکر کشور ضروری است. چغندرقند یکی از گیاهان زراعی مهم در ایران است که در محدوده وسیعی از شرایط اقلیمی کشت می‌شود. متوسط سطح زیر کشت چغندرقند از دهه ۶۰ تاکنون در کشور حدود ۱۵۰ هزار هکتار برآورد شده است. در برخی از سال‌ها سطح زیر کشت چغندرقند کاهش داشته و در سال زراعی ۹۳-۱۳۹۲ به کمتر از ۱۰۰ هزار هکتار رسید. هرچند بر اساس آخرین آمار ارائه شده توسط وزارت جهاد کشاورزی، برخلاف روند کاهشی چند سال اخیر، سطح زیر کشت چغندرقند در سال زراعی ۹۶-۱۳۹۵ اندکی افزایش داشته و به ۱۴۰ هزار هکتار رسیده است (Anonymous, 2018). یکی از مهم‌ترین دلایل کاهش سطح زیر کشت چغندرقند در سال‌های اخیر، طولانی بودن دوره رشد و نیاز آبی نسبتاً زیاد چغندرقند است. با توجه به اینکه چغندرقند تحمل نسبتا کمی به خشکی بلندمدت دارد، توجه به مدیریت آب و افزایش تولید به ازای آب آبیاری، یکی از مهم‌ترین چالش‌های پیش روی تولید این محصول است (Jabro *et al.*, 2014). بنابراین توجه به افزایش بهره‌وری مصرف آب، به‌ویژه در مناطق مواجه محدودیت منابع آبی، بسیار ضروری است (Molden *et al.*, 2010).

تحقیقات زیادی روی ارزیابی بهره‌وری آب در گیاهان زراعی مختلف صورت گرفته است (Mandare *et al.*, 2008; Qiu *et al.*, 2008; Ghasemi Dehghan *et al.*, 2011; Nezhad Raeini *et al.*, 2014). ساینی و برار (Saini and Brar, 2018) با ارزیابی بهره‌وری آب در گیاه چغندرقند در شیوه‌های مختلف آبیاری و روش‌های مختلف کشت گزارش کردند که جهت دستیابی به بهره‌وری آبی مناسب، کشت دو ردیفه روی پشته و انجام آبیاری در زمانی که نسبت آب مصرفی به میزان تبخیر تجمعی از تشتک تبخیر معادل ۰/۸ باشد، مناسب‌تر است. ال مارسافاوی و همکاران (El-Marsafawy *et al.*, 2018) وضعیت بهره‌وری آب در دلتای نیل را با استفاده از مدل CROPWAT8.0 در طول سه دهه (۱۹۸۵-۲۰۱۵) مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که بهره‌وری آب از دهه اول تا دهه دوم ۴۱ درصد و از دهه دوم تا دهه سوم ۲۲ درصد افزایش داشت که این موضوع عمدتا به دلیل افزایش قابل ملاحظه در عملکرد محصولات زراعی

(به‌دلیل استفاده از روش‌های بهتر و ارقام بهتر) بود. وظیفه دوست و همکاران (Vazifedoust *et al.*, 2008) در آزمایشی روش‌های افزایش بهره‌وری آب در منطقه برخوار اصفهان را با استفاده از مدل SWAP مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها گزارش کردند که بهبود عملیات آبیاری (زمان‌بندی و حجم آب آبیاری) باعث افزایش بهره‌وری آبیاری در گیاهان گندم، ذرت علوفه‌ای، آفتابگردان و چغندرقند (به‌ترتیب به میزان ۱/۵، ۱/۵، ۱/۳ و ۱/۱ کیلوگرم بر مترمکعب) خواهد شد. با توجه به نتایج پژوهش‌های صورت گرفته، به نظر می‌رسد که بازنگری در وضعیت بهره‌وری تولید محصولات کشاورزی در مناطق مختلف می‌تواند تاثیر زیادی در بهبود عملکرد آنها، با توجه به مهم‌ترین عامل محدود کننده تولید (آب)، داشته باشد.

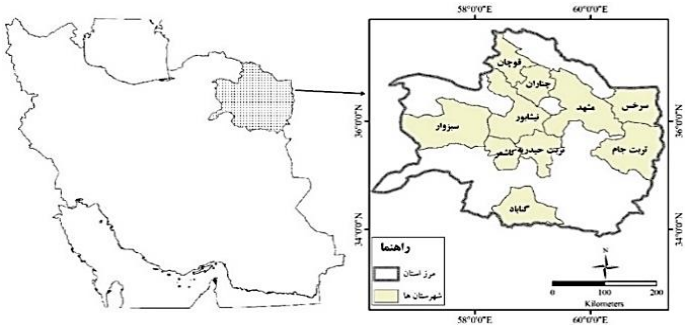
این پژوهش با هدف تعیین سهم محدودیت آب در نقصان عملکرد چغندرقند و همچنین وضعیت بهره‌وری آب در نظام‌های کشت چغندرقند و ارتباط آن با وضعیت خشکی در طول فصل رشد در ۱۰ شهرستان استان خراسان رضوی و نقش مدیریت صحیح در بهره‌وری آب و وقوع خشکی درطول فصل رشد چغندرقند اجرا شده است.

مواد و روش‌ها

این پژوهش با استفاده ار داده‌های بلند مدت اقلیمی؛ طی سال‌های ۱۳۶۴ تا ۱۳۹۴ در ۱۰ شهرستان استان خراسان رضوی اجرا شد. وسعت استان خراسان رضوی بیش از ۱۲۷ هزار کیلومترمربع است که بین مدار جغرافیایی ۳۳ درجه و ۵۲ دقیقه تا ۳۷ درجه و ۴۲ دقیقه عرض شمالی و ۵۶ درجه و ۱۹ دقیقه تا ۶۱ درجه و ۱۶ دقیقه طول شرقی قرارگرفته است (شکل ۱). استان خراسان رضوی از تنوع اقلیمی گسترده‌ای برخوردار است، با این حال بخش عمده‌ای از استان دارای آب و هوای خشک و نیمه خشک است. متوسط بارندگی سالیانه و دماهای کمینه و بیشینه مناطق مورد مطالعه در جدول ۱ ارائه شده است.

در این پژوهش میزان عملکرد و بهره‌وری آبی گیاه چغندرقند در سه سطح تولید پتانسیل، محدودیت آبی و واقعی در ۱۰ شهرستان استان خراسان رضوی مورد بررسی قرار گرفت. برای این منظور از نسخه‌ای از مدل شبیه سازی SUCROS (Van Laar *et al.*, 1997) استفاده شد. این مدل پیش‌تر و بر اساس چندین آزمایش مزرعه‌ای برای برآورد رشد و عملکرد گیاه چغندرقند، پارامترسازی و ارزیابی شده است (Deihimfard *et al.*, 2011). در این مدل سرعت فتوسنتز روزانه پوشش گیاهی بر اساس مقدار تابش دریافتی و رابطه فتوسنتز تک برگ و شدت نور دریافتی و انتگرال‌گیری بر حسب شاخص سطح برگ و طول روز برآورد می‌شود (Spitters *et al.*, 1989). پس از کسر تلفات ناشی از تنفس رشد و نگهداری، سرعت تجمع ماده خشک بر اساس سرعت فتوسنتز پوشش گیاهی محاسبه می‌شود. به‌منظور استفاده از این مدل در شرایط محدودیت آبی، بیلان آب (فرآیندهای تبخیر، تعرق، زه‌کشی، رواناب و جذب آب توسط ریشه‌ها) به مدل اضافه شده است. در مدل جهت برآورد تبخیر و تعرق پتانسیل از معادله ترکیبی پنمن- مونتیث استفاده شده است. اطلاعات بیشتر در رابطه با این مدل توسط ون‌لار (Van Laar *et al.*, 1997) ارائه شده است.

اطلاعات ورودی این مدل جهت برآورد رشد و تولید محصول در سطوح مختلف تولید، شامل داده‌های اقلیمی، خاکی و مدیریتی است. به این منظور اطلاعات بلندمدت اقلیمی شهرستان‌های مورد بررسی از سازمان هواشناسی کل کشور دریافت شد. این اطلاعات شامل تابش (ساعات آفتابی)، بیشینه و کمینه دما، بارش، سرعت باد و فشار بخار هوا بود. داده‌های خاکی مورد نیاز شامل محتوای رطوبتی در ظرفیت مزرعه و نقطه پژمردگی خاک بود که جهت شبیه‌سازی شرایط رطوبتی خاک به‌وسیله مدل استفاده می‌شوند. این



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی ۱۰ شهرستان مورد مطالعه در استان خراسان رضوی

Fig. 1. Geograghical situation of the 10 studied counties in Khorasan Razavi province, Iran

جدول ۱- میانگین بلند مدت دمای بیشینه، دمای کمینه و مجموع بارندگی سالیانه ۱۰ شهرستان مورد مطالعه در استان خراسان رضوی

Table 1. The long-term average of maximum temperature, minimum temperature, mean temperature and cumulative annual precipitation of 10 studied counties in khorasan razavi province, iran

County	شهرستان	دمای میانگین Mean temp. (◦C)	دمای بیشینه Max temp. (◦C)	دمای کمینه Min temp. (◦C)	بارندگی Rainfall (mm)
Chenaran	چناران	13.8	20.7	7.0	209.1
Gonabad	گناباد	17.6	24.1	11.2	125.7
Kashmar	کاشمر	17.6	23.2	12.1	188.1
Mashhad	مشهد	15.6	22.2	9.1	237.9
Neyshabur	نیشابور	14.5	22.2	6.8	235.1
Quchan	قوچان	12.8	19.7	5.9	318.0
Sabzevar	سبزوار	18.3	24.9	11.8	183.6
Sarakhs	سرخس	18.1	25.0	11.3	187.2
Torbat-E Heydariyeh	تربت حیدریه	14.2	20.7	7.7	255.7
Torbat-E Jam	تربت جام	15.8	22.6	9.0	164.6

داده‌ها از اطلاعات بافت خاک به‌دست آمده از آزمایش تاتاری (Tatari, 2008) و همچنین اطلاعات جمع‌آوری شده از پایش‌های میدانی و نیز با استفاده از توابع خاکی (Pedotransfer functions) در مدل SPAW (Soil-Plant-Air-Water) (Saxton and Willey, 2006) به‌دست آمد. سایر داده‌های مورد نیاز، شامل اطلاعات مدیریتی بود که با توجه به اهداف تحقیق، پرسشنامه‌ای تنظیم و بین کشاورزان چغندرکار ۱۰ شهرستان مورد نظر توزیع شد. این پرسشنامه‌ها حاوی سوالاتی مربوط به تاریخ کاشت و برداشت، زمان شروع آبیاری، مقدار و زمان آبیاری، نوع رقم چغندرقند، بافت خاک و عملکرد مزارع بود. در مجموع تعداد ۶۰ پرسشنامه از هر شهرستان جمع‌آوری گردید.

با فراهم شدن اطلاعات مورد نیاز، شبیه‌سازی‌های بلندمدت (۲۰ تا ۳۰ سال بسته به شهرستان) رشد چغندرقند در هر شهرستان انجام شد. شبیه‌سازی‌ها در دو سطح تولید پتانسیل و محدودیت آب [حداکثر عملکردی است که در شرایط محدودیت آبی (آب باران+ آب آبیاری که کشاورز امکان دسترسی به آن را دارد، جدول ۲) به دست می‌آید] جهت برآورد عملکرد و شبیه‌سازی روزانه رشد و شرایط رطوبتی خاک در طول فصل رشد در هر شهرستان انجام شد. بعلاوه شبیه‌سازی در شرایط محدودیت آب با تاریخ کشت واقعی (محدودیت آبی همراه با تاریخ کاشت واقعی

جدول ۲- جزئیات مربوط به تیمارهای شبیه‌سازی، مدیریت آب آبیاری و ویژگی‌های خاک‌های زیر کشت چغندرقند در ۱۰ شهرستان استان خراسان رضوی

Table 2. Details of simulation treatments, water management and soil properties of sugar beet fields of 10 counties in Khorasan Razavi province, Iran

County	شهرستان	تعداد سال‌های شبیه‌سازی Number of simulation years	تاریخ کشت Sowing date	زمان شروع آبیاری Start of irrigation	دفعات آبیاری Number of irrigations	رطوبت خاک در ظرفیت مزرعه Soil water content at FC ($cm^3.cm^{-3}$)	رطوبت خاک در نقطه پژمردگی Soil water content at WP ($cm^3.cm^{-3}$)	ظرفیت نگهداری آب خاک Soil water holding capacity (mm)
Chenaran	چناران	20	۱۵ فروردین.Apr 4	۱۵ فروردین.Apr 4	18	0.4	0.24	160
Gonabad	گناباد	23	۱۵ فروردین.Apr 4	۲۰ فروردین.Apr 9	19	0.27	0.10	170
Kashmar	کاشمر	24	۱ اردیبهشت.Apr 21	۱ خردادMay 22	9	0.32	0.12	200
Mashhad	مشهد	24	۱ فروردین.Mar 21	۳۰ فروردین.Apr 19	15	0.36	0.11	250
Neyshabur	نیشابور	24	۲۵ فروردین.Apr 14	۳۰ فروردین.Apr 19	14	0.34	0.20	140
Quchan	قوچان	23	۱ اردیبهشت.Apr 21	۱۰ اردیبهشت.Apr 30	17	0.34	0.20	140
Sabzevar	سبزوار	24	۱۵ فروردین.Apr 4	۱۵ فروردین.Apr 4	14	0.27	0.10	170
Sarakhs	سرخس	31	۲۰ فروردین.Apr 9	۱۰ اردیبهشت.Apr 30	14	0.34	0.20	140
Torbat-E Heydariyeh	تربت حیدریه	31	۱۵ فروردین.Apr 4	۱۵ فروردین.Apr 4	19	0.36	0.11	250
Torbat-E Jam	تربت جام	23	۲۰ فروردین.Apr 9	۱۰ اردیبهشت.Apr 30	14	0.36	0.11	250

کشاورزان هر منطقه، جدول ۲) در هر شهرستان جهت شبیه‌سازی روزانه رشد گیاه زراعی و شرایط رطوبتی خاک در طول فصل رشد صورت گرفت. تاریخ کشت بهینه در کلیه شبیه‌سازی‌های مربوط به عملکرد پتانسیل و عملکرد در شرایط محدودیت آب، اول اسفند در نظرگرفته شده و تاریخ کشت واقعی نیز با توجه به اطلاعات جمع‌آوری شده از کشاورزان هر شهرستان در نظر گرفته شد (جدول ۲). در کلیه شبیه‌سازی‌ها عمق خاک ۱۰۰ سانتی‌متر و تراکم ۱۰ بوته در مترمربع در نظر گرفته شد. محتوای رطوبتی خاک در شرایط ظرفیت مزرعه و نقطه پژمردگی و دفعات آبیاری در شرایط آبی واقعی؛ بر اساس اطلاعات به‌دست آمده از پرسشنامه‌های مربوط به هر شهرستان تعیین شد. مقادیر عملکرد پتانسیل و عملکرد در شرایط محدودیت آب بر اساس خروجی‌های مدل استخراج شد و مقادیر عملکرد واقعی در هر شهرستان نیز بر اساس اطلاعات دریافت شده از سازمان جهاد کشاورزی و اطلاعات پرسشنامه‌های هر شهرستان تعیین شد. جزئیات مربوط به تیمارهای شبیه‌سازی در هر شهرستان در جدول ۲ ارائه شده است. با توجه به اینکه در سیستم‌های کشت فشرده با وجود بهترین شرایط مدیریتی، محدودیت از نظر ماشین آلات و محدودیت در کارایی اقتصادی تولید، مانع از رسیدن تولید به مقادیر پتانسیل است و میزان تولید در بهترین حالت به ۷۵ تا ۸۵ درصد از تولید پتانسیل می‌رسد (Espe *et al.*, 2016; van Ittersum *et al.*, 2013)، بنابراین ۸۵ درصد از عملکردهای پتانسیل شبیه‌سازی شده توسط مدل، به عنوان عملکرد قابل دستیابی (Attainable yield) در نظر گرفته شده و کلیه محاسبات بر اساس عملکرد قابل دستیابی صورت گرفت.

با توجه به عملکردهای قابل دستیابی (AY)، عملکرد در شرایط محدودیت آب (Y_w) و عملکرد واقعی (Y_a) در هر شهرستان، مقادیر خلاء عملکرد کل (Y_G)، خلاء عملکرد در شرایط محدودیت آب (Y_{Gw}) و خلاء عملکرد ناشی از سایر عوامل (سایر عوامل محدود کننده و کاهنده تولید مانند شوری خاک، تاریخ کشت نامناسب، آفات و بیماری‌ها، کمبود عناصر غذایی و ...) (Y_{Go}) در هر شهرستان برآورد شد (Wang *et al.*, 2014; Deihimfard *et al.*, 2015) (رابطه‌های ۱ تا ۳).

$$Y_G=A_Y-Y_a \quad \text{(رابطه ۱)}$$

$$Y_{GW}=AY-Y_W \quad \text{(رابطه ۲)}$$

$$Y_{GO}=Y_G-Y_{GW} \quad \text{(رابطه ۳)}$$

مقدار بهره‌وری آب در هر شهرستان برای تمام سطوح عملکرد و تمام سال‌های شبیه‌سازی به عنوان معیاری از ارزش آبی هر واحد عملکرد تولید شده محاسبه گردید (Saini and Brar, 2018):

$$WP=\frac{Rootyield(Kg.ha^{-1})}{Waterapplied(m^3.ha^{-1})} \quad \text{(رابطه ۴)}$$

WP: بهره‌وری آب است که از نسبت بین عملکرد ریشه چغندرقند به میزان آب استفاده شده در طول فصل رشد برآورد می‌شود. علاوه بر بهره‌وری آب، شاخص عرضه به تقاضای آب (Supply/Demand) در تمامی سطوح عملکرد اشاره شده در بالا محاسبه شده و روند این شاخص در طول فصل رشد نیز مورد ارزیابی قرار گرفت:

$$SDR=\frac{Soil\ water\ supply}{Crop\ Water demand} \quad \text{(رابطه ۵)}$$

$$Water\ Supply=\Sigma(sw(layer)-ll(layer))*\ kl(layer) \quad \text{(رابطه ۶)}$$

$$Water demand=\frac{\Delta DM*VPD}{Transp-eff} \quad \text{(رابطه ۷)}$$

میزان عرضه آب با توجه به مقدار آب موجود در هر لایه از خاک زراعی که ریشه گیاه در آن حضور دارد، محاسبه می‌شود. *sw*: محتوای رطوبتی آب در لایه خاک مورد نظر (برحسب میلی‌متر)، *ll*: محتوای آب خاک در نقطه پژمردگی (بر حسب میلی‌متر) و *kl*: سرعت خروج آب از گیاه (در روز) است. ΔDM: تغییرات روزانه ماده خشک در شرایط پتانسیل (گرم ماده خشک تولیدی در مترمربع در روز)، *Transp_eff*: میزان کارایی تعرق ($g.m^{-2}.mm^{-1}.kPa$) و *VPD*: (کیلوپاسکال) معیاری از وضعیت رطوبتی هوای

پوشش گیاهی است که با استفاده از فشار بخار اشباع در دماهای بیشینه و کمینه محاسبه می‌شود. شاخص عرضه به تقاضای آب به صورت روزانه در طول فصل رشد محاسبه می‌شود و نشان دهنده میزان انطباق فراهمی آب خاک و میزان نیاز گیاه است. مقدار این شاخص بین صفر و ۱ متغیر است که عدد ۱ نشان دهنده هم‌خوانی عرضه آب توسط خاک و تقاضای آبی گیاه است (عدم محدودیت آب) و صفر نشان دهنده تنش شدید آبی به دلیل فقدان تامین آب مورد نیاز گیاه است (Chauhan *et al.*, 2017).

نتایج و بحث

نتایج شبیه‌سازی‌های بلندمدت در سطح تولید قابل دستیابی نشان‌دهنده پتانسیل بالای شهرستان‌های استان خراسان رضوی در تولید چغندرقند در شرایط کمبود آب و مواد غذایی و عدم وجود آفات و بیماری‌ها و علف‌های هرز بود. نتایج تجزیه و تحلیل شبیه‌سازی‌ها نشان داد که متوسط عملکرد قابل دستیابی چغندرقند در تمام شهرستان‌ها و سال‌های شبیه‌سازی ۹۷/۳ تن در هکتار بود که کمترین مقدار مربوط به شهرستان سرخس (۹۱/۲ تن درهکتار) و بیشترین مقدار مربوط به شهرستان تربت حیدریه (۱۰۳/۴ تن درهکتار) بود (جدول ۳). اختلاف اندک به دلیل تفاوت اقلیمی شهرستان‌های مورد بررسی به‌ویژه دمای هوا بود. برای مثال میانگین دمای هوا شهرستان‌های سرخس و تربت حیدریه به‌ترتیب ۱۸/۱ و ۱۴/۲ درجه سانتی‌گراد بود که با توجه به اینکه چغندرقند گیاهی سازگار با مناطق معتدل است، در نتیجه شرایط دمایی معتدل‌تر در کشت بهاره باعث عملکرد بیشتر در شرایط تولید قابل دستیابی گردید.

جدول ۳- میانگین بلندمدت عملکرد قابل دستیابی، عملکرد در شرایط محدودیت آب و عملکرد واقعی چغندر قند در ۱۰ شهرستان استان خراسان رضوی *

Table 3. Long-term average of attainable yield, water-limited yield and actual yield of sugar beet in 10 counties in Khorasan Razavi province, Iran*

County	شهرستان	عملکرد قابل دستیابی Attainable yield (t.ha^{-1})	عملکرد در شرایط محدودیت آب Water-limited yield (t.ha^{-1})	عملکرد واقعی Actual yield (t.ha^{-1})
Chenaran	چناران	101.9±12.3	75.2±17.8	41.6±9.3
Gonabad	گناباد	95.1±3.9	72.7±12.6	31.2±4.4
Kashmar	کاشمر	95.6±4.3	54.4±12.9	22.3±7.9
Mashhad	مشهد	97.9±4.9	68.9±12.3	33.1±7.3
Neyshabur	نیشابور	99.3±14.4	82.1±17.6	33.8±4.7
Quchan	قوچان	98.9±10.7	87.8±12.7	34.8±8.6
Sabzevar	سبزوار	92.9±3.7	38.5±6.5	27.2±6.9
Sarakhs	سرخس	91.2±4.4	63.2±8.0	35.2±8.3
Torbat-E Heydariyeh	تربت حیدریه	103.4±10.1	79.2±17.9	36.7±4.9
Torbat-E Jam	تربت جام	97.3±9.8	45.8±7.9	38.8±6.7

* مقادیر عملکرد قابل دستیابی و عملکرد در شرایط محدودیت آب توسط مدل شبیه سازی شده‌اند و عملکرد واقعی از گزارش‌های سازمان جهاد کشاورزی اخذ شده است

* Attainable yield and water-limited yield are simulated by model and actual yield was obtained from Jihad Agriculture organization reports

خروجی‌های به‌دست آمده از مدل نشان دهنده تفاوت قابل‌توجه عملکرد چغندرقند در شرایط محدودیت آب در شهرستان‌های مورد بررسی بود. شهرستان قوچان با تولید ۸۷/۸ تن در هکتار در شرایط محدودیت آب، بیشترین عملکرد را داشت و کمترین عملکرد در شرایط محدودیت آب با ۳۸/۵ تن در هکتار به شهرستان سبزوار تعلق داشت (جدول ۳). تفاوت چشمگیر عملکرد در شهرستان‌های مختلف

(۴۹/۳ تن در هکتار) به‌طور عمده به دلیل تفاوت در مدیریت آبی (زمان‌بندی آبیاری و حجم آب آبیاری) اعمال شده توسط کشاورزان، وضعیت اقلیمی (دما و بارش) و ویژگی‌های خاک (ظرفیت نگهداری آب خاک) در هر شهرستان بود. بطور مثال سه نوبت آبیاری بیشتر در شهرستان قوچان در مقایسه با شهرستان سبزوار (جدول ۲) و در کنار آن ۱۹۸ میلی‌متر بارندگی در قوچان در مقابل ۱۰۹ میلی‌متر بارندگی در سبزوار در ماه‌های ابتدایی رشد چغندرقند، از دلایل مهم در اختلاف عملکرد آب محدود این دو شهرستان بود. علاوه بر فراهمی بیشتر آب در شهرستان قوچان، متوسط دمای سالیانه هوا در شهرستان‌های قوچان و سبزوار به‌ترتیب ۱۲/۸ و ۱۸/۳ درجه سانتی‌گراد بود (جدول ۱) که این اختلاف دما باعث تبخیر و تعرق کمتر (۱۰۹۹ میلی‌متر در قوچان و ۱۳۶۵/۵ میلی‌متر در سبزوار) و تنفس کمتر چغندرقند در قوچان در مقایسه با سبزوار (به‌ترتیب ۱۳۶۳/۸ و ۲۴۱۲/۸ گرم CH_2O در مترمربع) در شرایط محدودیت آب شد که در نهایت باعث عملکرد بیشتر چغندرقند در شرایط محدودیت آب در شهرستان قوچان گردید. البته ظرفیت بالاتر نگهداری آب خاک در سبزوار در مقایسه با قوچان هم باعث کاهش اختلاف عملکرد چغندرقند این دو منطقه نشد.

بر اساس اطلاعات به‌دست آمده از سازمان جهاد کشاورزی و نتایج پرسشنامه‌های تکمیل شده در هر شهرستان، عملکرد واقعی کشاورزان بین ۲۲/۳ (شهرستان کاشمر) تا ۴۱/۶ (شهرستان چناران) تن در هکتار با میانگین ۳۳/۴ تن در هکتار در کلیه شهرستان‌ها بود (جدول ۳). این میزان تولید برآیند تاثیر عوامل مختلف محیطی (زنده و غیرزنده) بر تولید گیاه است. نتایج نشان‌دهنده تاثیر بالای عوامل محدود کننده و کاهنده رشد بر عملکرد چغندرقند بود به طوری که میانگین عملکرد واقعی کشاورزان در حدود یک سوم عملکرد قابل دستیابی در شهرستان‌های مورد بررسی بود. بر اساس اطلاعات بدست آمده از کشاورزان چغندرکار این مناطق و نتایج پرسشنامه‌ها، عواملی مانند عدم دسترسی به منابع آبی کافی در طول فصل رشد، شوری خاک، آفات، علف‌های هرز، عدم تغذیه مناسب گیاه زراعی، آماده‌سازی نامطلوب زمین به‌دلیل زمان ناکافی و سرمازدگی‌های ابتدا و انتهای فصل رشد، مهم‌ترین عوامل تاثیرگذار در کاهش تولید چغندرقند بودند.

جدول ۴- میانگین بلندمدت خلاء عملکرد کل، شرایط محدودیت آب و سایر عوامل در چغندرقند در ۱۰ شهرستان استان خراسان رضوی

Table 4. Long-term average of total yield gap, water-limited yield gap and other factors yield gap of sugar beet in 10 counties in Khorasan Razavi province, Iran

County	شهرستان	خلاء عملکرد کل Total yield gap ($t.ha^{-1}$)	خلاء عملکرد شرایط محدودیت آب Water-limited yield gap ($t.ha^{-1}$)	خلاء عملکرد سایر عوامل Other factors yield gap ($t.ha^{-1}$)
Chenaran	چناران	60.3	26.7	33.6
Gonabad	گناباد	63.9	22.4	41.5
Kashmar	کاشمر	73.3	41.1	32.2
Mashhad	مشهد	64.8	29.1	35.8
Neyshabur	نیشابور	65.5	17.2	48.2
Quchan	قوچان	64.2	11.1	53.1
Sabzevar	سبزوار	65.7	54.3	11.4
Sarakhs	سرخس	56.0	28.1	27.9
Torbat-E Heydariyeh	تربت حیدریه	66.6	24.2	42.4
Torbat-E Jam	تربت جام	58.6	51.5	7.0

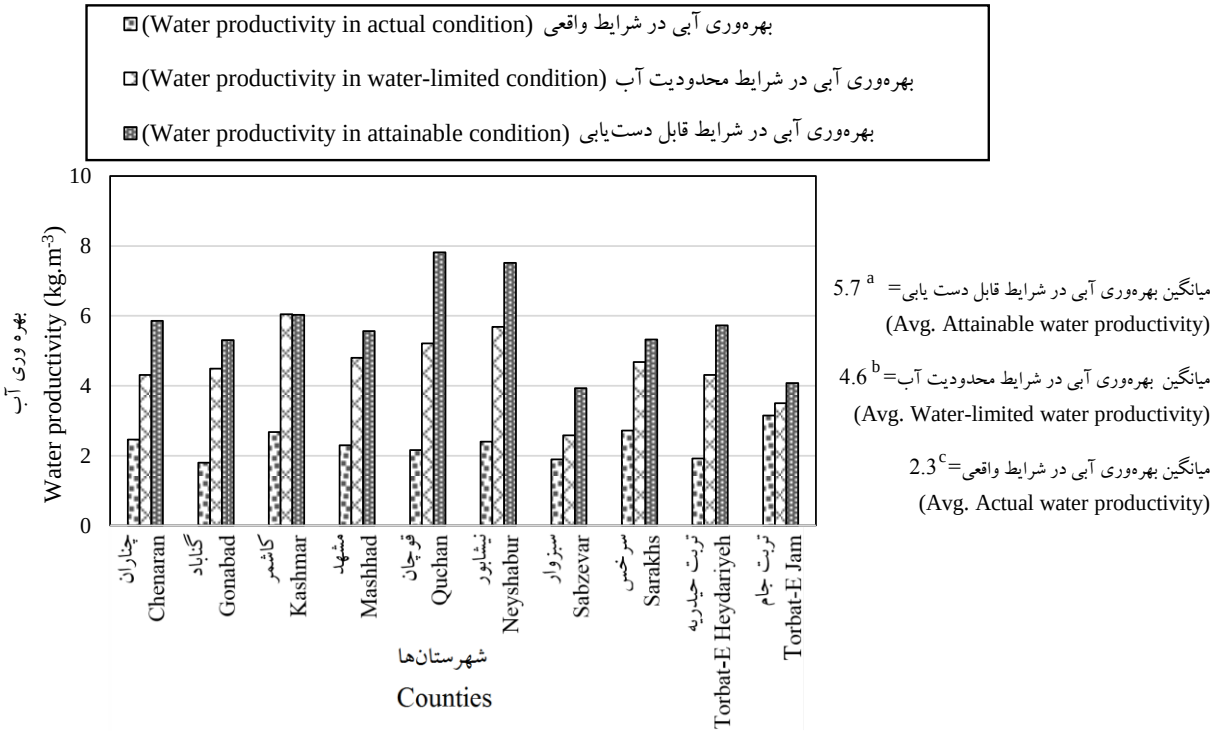
تفاوت بین عملکرد قابل‌دستیابی و واقعی مربوط به هریک از شهرستان‌ها نشان داد که متوسط خلاء عملکرد چغندرقند در استان ۶۳/۹ تن در هکتار (حدود دو برابر عملکرد واقعی کشاورزان) است (جدول ۴). کمترین خلاء عملکرد مربوط به شهرستان سرخس (۵۶/۰ تن در هکتار) و بیشترین خلاء (۷۳/۳ تن در هکتار) مربوط به کاشمر بود. این نتایج نشان دهنده اهمیت توجه به وضعیت کشت چغندرقند در استان خراسان رضوی و شناسایی مهم‌ترین عوامل تاثیرگذار بر این افت عملکرد است.

با استخراج سهم محدودیت آب در خلاء عملکرد چغندرقند، نتایج نشان دهنده سهم قابل توجه محدودیت آب در کاهش عملکرد و افت تولید در شهرستان‌های مورد بررسی بود. با توجه به نتایج ارائه شده در جدول ۴، بیشترین مقدار خلاء عملکرد در شرایط محدودیت آب چغندرقند در شهرستان سبزوار (۵۴/۳ تن در هکتار) بود و کمترین مقدار آن در شهرستان قوچان (۱۱/۱ تن در هکتار) بود. متوسط خلاء عملکرد ناشی از محدودیت آب در شهرستان‌های مورد بررسی ۳۰/۶ تن در هکتار بود که این میزان نشان دهنده سهم ۴۸ درصدی محدودیت آب در ایجاد خلاء عملکرد چغندرقند در استان خراسان رضوی است. این موضوع اهمیت توجه به مدیریت آبیاری (زمان‌بندی آبیاری و حجم آب آبیاری) مزارع چغندرقند در هر شهرستان بر اساس شرایط اقلیمی و خاکی جهت کاهش خلاء عملکرد چغندرقند در استان را نشان می‌دهد. نتایج به‌دست آمده نشان داد که مدیریت نامطلوب آبیاری (زمان‌بندی ناصحیح آبیاری‌ها طبق نیاز گیاه زراعی) باعث کاهش قابل توجه عملکرد گیاه چغندرقند در شهرستان‌های مورد بررسی داشت. بعنوان مثال تعداد دفعات آبیاری‌های صورت گرفته در طول فصل رشد در شهرستان‌های سبزوار و تربت جام ۱۴ مرتبه ثبت شده و مقدار خلاء عملکرد ناشی از محدودیت آب در این شهرستان‌ها به‌ترتیب ۵۴/۳ و ۵۱/۵ تن در هکتار بود، در حالی که در شهرستان کاشمر با تعداد آبیاری کمتر (۹ مرتبه)، خلاء عملکرد ناشی از محدودیت آب ۴۱/۱ تن در هکتار بود. این موضوع نشان دهنده ضعف مدیریت آبیاری در شهرستان‌های سبزوار و تربت‌جام بود. نتایج به‌دست آمده از خروجی‌های مدل نشان داد که در شهرستان‌های قوچان، نیشابور، چناران و تربت حیدریه، مقدار آب آبیاری ورودی به مزارع در شرایط محدودیت آب بیشتر یا برابر مقدار آب ورودی در شرایط بدون محدودیت آب بود که این موضوع نشان دهنده مدیریت نامناسب آبیاری در مناطق مورد بررسی است. بعلاوه تفاوت در نیاز آبی گیاه در شهرستان‌های مختلف به‌دلیل تفاوت در دمای هوا نیز بر این موضوع تاثیرگذار بود. بعنوان مثال در شهرستان‌های نیشابور، سرخس، تربت جام و سبزوار با وجود تعداد آبیاری برابر (۱۴ مرتبه)، خلاء عملکرد ناشی از محدودیت آب به ترتیب ۱۷/۲، ۲۸/۱، ۵۱/۵ و ۵۴/۳ تن در هکتار بود که این تفاوت به‌دلیل تفاوت دمایی (متوسط دمای سالیانه به‌ترتیب ۱۴/۵، ۱۸/۱، ۱۵/۸ و ۱۸/۳ درجه سانتی‌گراد) و تفاوت در مدیریت آبیاری در این شهرستان‌ها بود. با توجه به این نتایج و محدودیت منابع آبی در استان خراسان رضوی، اصلاح مدیریت آبیاری در مزارع چغندرقند جهت تولید محصول بیشتر به ازای میزان آب مصرفی (افزایش بهره‌وری مصرف آب آبیاری) ضروری است.

با توجه به نتایج ارائه شده در جدول ۴، خلاء عملکرد ناشی از سایر عوامل در شهرستان‌های مورد ارزیابی تنوع زیادی داشت، به طوری که شهرستان تربت جام با ۷/۰ تن در هکتار و شهرستان قوچان با ۵۳/۱ تن در هکتار، به‌ترتیب کمترین و بیشتر خلاء عملکرد ناشی از سایر عوامل را داشتند. با توجه به اینکه عوامل مختلفی روی این خلاء تاثیر گذار هستند، شناسایی مهم‌ترین عوامل و تلاش در کاهش اثرات نامطلوب آن‌ها ضروری است. با توجه به اطلاعات جمع‌آوری شده از پرسشنامه‌ها، عواملی مانند سرما

زدگی در ابتدای فصل رشد، عدم صرفه اقتصادی استفاده از کودهای شیمیایی و استفاده از کودهای حیوانی به جای آن، شوری آب آبیاری، شیوع آفات، بیماری‌ها و علف‌های هرز، تاثیرگذارترین عوامل در خلاء ناشی از سایر عوامل بودند. بر اساس اطلاعات به‌دست آمده از پرسشنامه‌های شهرستان‌های قوچان و نیشابور (شهرستان‌های با بیشترین خلاء عملکرد ناشی از سایر عوامل)، به نظر می‌رسد که سرمازدگی بهاره (دمای کمینه به‌ترتیب ۵/۹ و ۶/۸ درجه سانتی‌گراد) و همچنین عدم استفاده مطلوب از فصل رشد به دلیل کاشت دیرهنگام (به ترتیب اول اردیبهشت و ۲۵ فروردین)، مهم‌ترین عوامل محدود کننده عملکرد چغندرقند در این شهرستان‌ها بود.

با استفاده از اطلاعات حجم آب ورودی به مزارع و میزان عملکرد به‌دست آمده در سطوح مختلف، میزان بهره‌وری آب در شهرستان‌های مورد ارزیابی شبیه‌سازی شد. مقایسه میانگین‌ها نشان داد که تفاوت بین میانگین بهره‌وری آب چغندرقند در کلیه شهرستان‌ها در سطوح مختلف تولید، معنی‌دار بود (شکل ۲). این موضوع نشان دهنده تفاوت میزان تولید در ازای آب آبیاری وارد شده به مزارع در سطوح مختلف تولید است. با توجه به اینکه در سطح تولید قابل دستیابی (برآورد شده با استفاده از شبیه‌سازی) با وجود مصرف بالای آب جهت تامین نیاز آبی گیاه، محیط رشد عاری از هرگونه عامل محدود کننده و کاهنده رشد در نظر گرفته می‌شود، در نتیجه بهره‌وری آبی بالاتر به دلیل عملکرد بالاتر، در



شکل ۲- بهره‌وری آب در سطوح مختلف تولید چغندرقند در ۱۰ شهرستان استان خراسان رضوی در شرایط عملکرد قابل دستیابی، محدودیت آب و واقعی. میانگین‌هایی که دارای حروف مشترک هستند، بر اساس آزمون LSD در سطح احتمال پنج درصد تفاوت معنی‌داری ندارند

Fig. 2. Water productivity in sugar beet production systems in 10 counties in Khorasan Razavi province, Iran in attainable, water-limited and actual yield conditions. Means with similar letters are not significantly different at 5% probability level, using LSD test

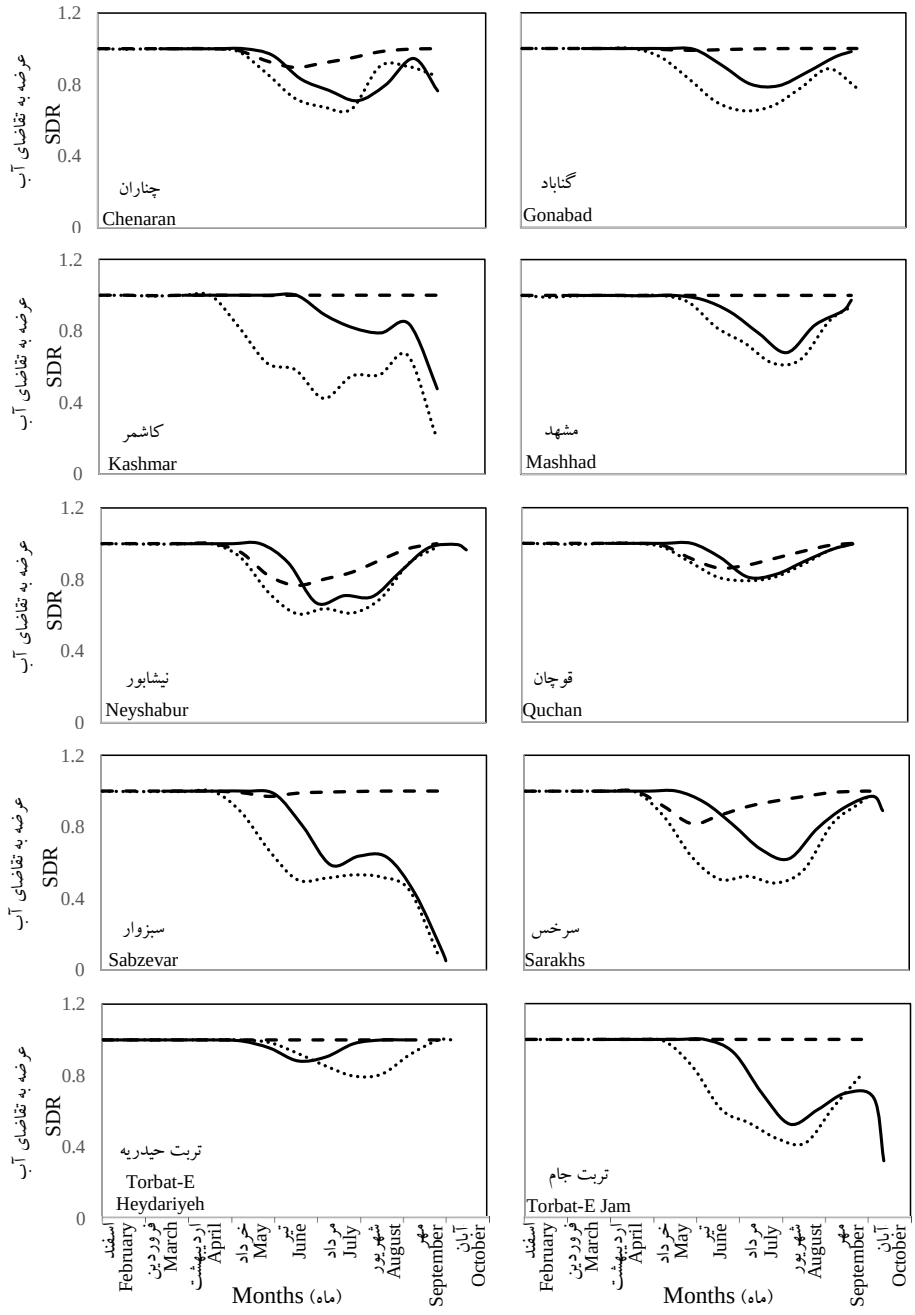
مقایسه با سایر سطوح تولید، منطقی به‌نظر می‌رسد. در سطح تولید واقعی، میزان بهره‌وری آب کمترین مقدار را داشت که هرچند بخشی از آن به دلیل عملکرد پایین (ناشی از تاثیر عوامل کاهنده و محدود کننده رشد و رقابت با علف‌های هرز برای آب) است، اما بخشی از آن نیز به‌دلیل مدیریت ناصحیح آبیاری (زمان‌بندی و تعداد دفعات آبیاری) است که می‌توان اثر آن را در بهره‌وری آب در شرایط محدویت آب مشاهده کرد.

بر اساس نتایج ارائه شده در شکل ۲، بهره‌وری آبی چغندرقند در شرایط تولید قابل دستیابی بین ۳/۹۴ (در شهرستان سبزوار) و ۷/۸۱ (در شهرستان قوچان) کیلوگرم بر مترمکعب بود که این اختلاف تقریبا دو برابری نشان دهنده قابلیت‌های هر شهرستان در تولید چغندرقند به ازای آب مصرفی است. اختلاف زیاد بین شهرستان‌ها در تولید چغندرقند به ازای آب مصرفی می‌تواند به دلیل تفاوت در میانگین دمای هوا در این شهرستان‌ها و به تبع آن تفاوت در تبخیر و تعرق در طول فصل رشد باشد. بعنوان مثال در سطح تولید قابل دستیابی، میانگین دمای فصل رشد و میزان تبخیر و تعرق در طول فصل رشد در شهرستان سبزوار به ترتیب ۲۳/۴ درجه سانتی‌گراد و ۲۴۰۲ میلی‌متر بود و در مقابل در شهرستان قوچان میانگین دمای فصل رشد و میزان تبخیر و تعرق در طول فصل رشد به ترتیب ۱۷/۳ درجه سانتی‌گراد و ۱۲۹۰ میلی‌متر بود. با توجه به اینکه بهره‌وری آبی بالا در این سطح به شکل قابل توجهی تحت تاثیر عملکرد بالای به‌دست آمده در شرایط عدم محدودیت در این شهرستان‌ها است و مقدار آب ورودی در این سطح در اغلب مناطق بیشتر از پتانسیل‌های آبی این مناطق است، در نتیجه در صورت رساندن عملکرد به این سطح، با توجه به فشار بیش از حد به منابع آبی و تخلیه آن‌ها، به احتمال زیاد پایداری تولید در معرض خطر قرار خواهد گرفت.

میزان بهره‌وری آبی مزارع چغندرقند در سطح محدودیت آب در استان خراسان رضوی نیز بسیار متغیر بود. بیشترین میزان بهره‌وری در شهرستان کاشمر (۶/۰۵ کیلوگرم بر مترمکعب) و کمترین مقدار در سبزوار (۲/۵۹ کیلوگرم در مترمکعب) بدست آمد (شکل ۲). با توجه به اینکه بهره‌وری آبی به طور مستقیم تحت تاثیر مقدار عملکرد محصول و مقدار آب وارد شده به مزرعه است، بنابراین با توجه به عملکرد کمتر چغندرقند در سبزوار نسبت به کاشمر در شرایط محدودیت آب (به ترتیب ۳۸/۵۵ و ۵۴/۴۴ تن در هکتار، جدول ۳) و تعداد دفعات آبیاری بیشتر در مقایسه با کاشمر (۱۵ مرتبه در مقابل ۹ مرتبه، جدول ۲)، تفاوت زیاد در بهره‌وری آب این دو شهرستان قابل توجیه است. اختلاف در بهره‌وری آبی این شهرستان‌ها نشان دهنده اثرگذاری بیشتر آبیاری‌ها در شهرستان کاشمر بود که می‌تواند تحت تاثیر عوامل مختلف مانند مدیریت (زمان‌بندی) صحیح آبیاری، دمای هوا (تفاوت در تبخیر و تعرق) و استفاده مطلوب از بارش‌های بهاره باشد. بعنوان مثال در شهرستان کاشمر آبیاری‌ها در اوایل خرداد (حدود یک ماه پس از کشت) صورت می‌گیرد و در شهرستان سبزوار آبیاری‌ها بلافاصله پس از کشت (اواسط فروردین ماه) شروع می‌شود، در حالی که با توجه به آمار بلند مدت اقلیمی، بارندگی‌های موثر در این مناطق تا خرداد به طول می‌انجامد. علاوه بر این، دمای نسبتا بیشتر در شهرستان سبزوار در مقایسه با شهرستان کاشمر (۰/۷ درجه سانتی‌گراد) باعث تبخیر و تعرق بیشتر در سبزوار نسبت به کاشمر (به‌ترتیب ۱۳۶۵/۵ و ۱۰۵۷/۱ میلی‌متر) گردید. با توجه به اینکه در این سطح تولید، تنها آب عامل محدود کننده است، در نتیجه بهره‌وری آبی می‌تواند معیار مناسبی در ارزیابی وضعیت مدیریت آبی مزارع چغندرقند در شهرستان‌های استان باشد.

نتایج به‌دست آمده از شکل ۲ نشان داد که بهره‌وری آبی چغندرقند در شرایط واقعی با پتانسیل آن بسیار متفاوت است. همانطور که قبلا اشاره شد بخشی از پایین بودن بهره‌وری آب در شرایط واقعی در مقایسه

با شرایط قابل دستیابی، به دلیل عدم اعمال مدیریت مطلوب در آبیاری مزارع بوده و بخش دیگر آن به دلیل اثر سایر عوامل زنده و غیرزنده محیطی بر عملکرد و جذب آب توسط گیاه است. میزان بهره‌وری آب در شرایط واقعی در مزارع چغندرقند استان بین ۱/۸ و ۳/۱۵ کیلوگرم در مترمکعب بود که کمترین و بیشترین مقدار آن به‌ترتیب در شهرستان‌های گناباد و تربت جام به‌دست آمدند. بهره‌وری آبی چغندرقند شهرستان‌های



شکل ۳- میانگین بلندمدت شاخص عرضه به تقاضای آب (*SDR*) در سطوح مختلف تولید چغندرقند در ۱۰ شهرستان استان خراسان رضوی در شرایط عملکرد قابل دستیابی (---)، محدودیت آب (.....)و واقعی (——)

Fig. 3. Long-term average of Supply-Demand ratio (SDR) in sugar beet production systems in 10 counties in Khorasan Razavi province, Iran in attainable (----), water-limited (……) and actual yield (——) conditions

مورد بررسی در شرایط مختلف نشان داد که وضعیت مدیریتی مزارع چغندرقند در شهرستان‌های استان متفاوت است. بعنوان مثال شهرستان سبزوار در شرایط تولید قابل دستیابی کمترین مقدار بهره‌وری آبی را در مقایسه با سایر شهرستان‌ها داشت، درحالی که بهره‌وری آبی در شرایط واقعی در این شهرستان بهترین وضعیت را نسبت به سایر شهرستان‌ها داشت (کمتر از یک کیلوگرم بر مترمکعب تفاوت بین بهره‌وری آبی در شرایط واقعی و شرایط تولید قابل دستیابی). در مقابل در شهرستان قوچان اختلاف بین بهره‌وری آبی در شرایط واقعی و شرایط قابل دستیابی ۵/۶۵ کیلوگرم بر مترمکعب بود. با توجه به نتایج به‌دست آمده و اطلاعات جمع‌آوری شده از کشاورزان، علاوه بر عوامل موثر بر کاهش عملکرد (تغذیه گیاه، آفات و بیماری‌ها و ...)، عواملی مانند شوری آب، رقابت علف‌های هرز با گیاه زراعی بر سر آب و روش‌های آبیاری با کارایی آبیاری پایین مانند روش کرتی، مهم‌ترین عوامل تاثیرگذار بر کاهش بهره‌وری آب در شرایط تولید واقعی در مناطق مورد مطالعه بود.

به منظور درک بهتر وضعیت رطوبتی سطوح مختلف تولید چغندرقند در طول فصل رشد در هر شهرستان، میانگین بلندمدت شاخص عرضه به تقاضای آب (Supply-Demand Ratio) (SDR) به عنوان یک شاخص خشکی به صورت روزانه در شرایط تولید واقعی، محدودیت آب و قابل دستیابی شبیه‌سازی شد (شکل ۳). نتایج نشان داد که در کلیه شهرستان‌ها وضعیت شاخص عرضه به تقاضا در شرایط قابل دستیابی بسیار مطلوب‌تر از شرایط محدودیت آب و واقعی بود و در اغلب شهرستان‌ها در طول فصل رشد تقریبا برابر با یک بود. این موضوع نشان دهنده عدم وقوع تنش رطوبتی در طول فصل رشد برای گیاه در شرایط تولید قابل دستیابی بود. البته در شهرستان‌های چناران، قوچان، نیشابور و سرخس این شاخص در طول ماه‌های خرداد تا شهریور کمی روند کاهشی داشت. این موضوع می‌تواند به علت ظرفیت پایین‌تر نگهداری آب خاک در این شهرستان‌ها (۱۴۰ تا ۱۶۰ میلی‌متر، جدول ۲) و در نتیجه عدم تامین نیاز آبی روزانه گیاه در این ماه‌ها به دلیل تبخیر و تعرق زیاد گیاه باشد.

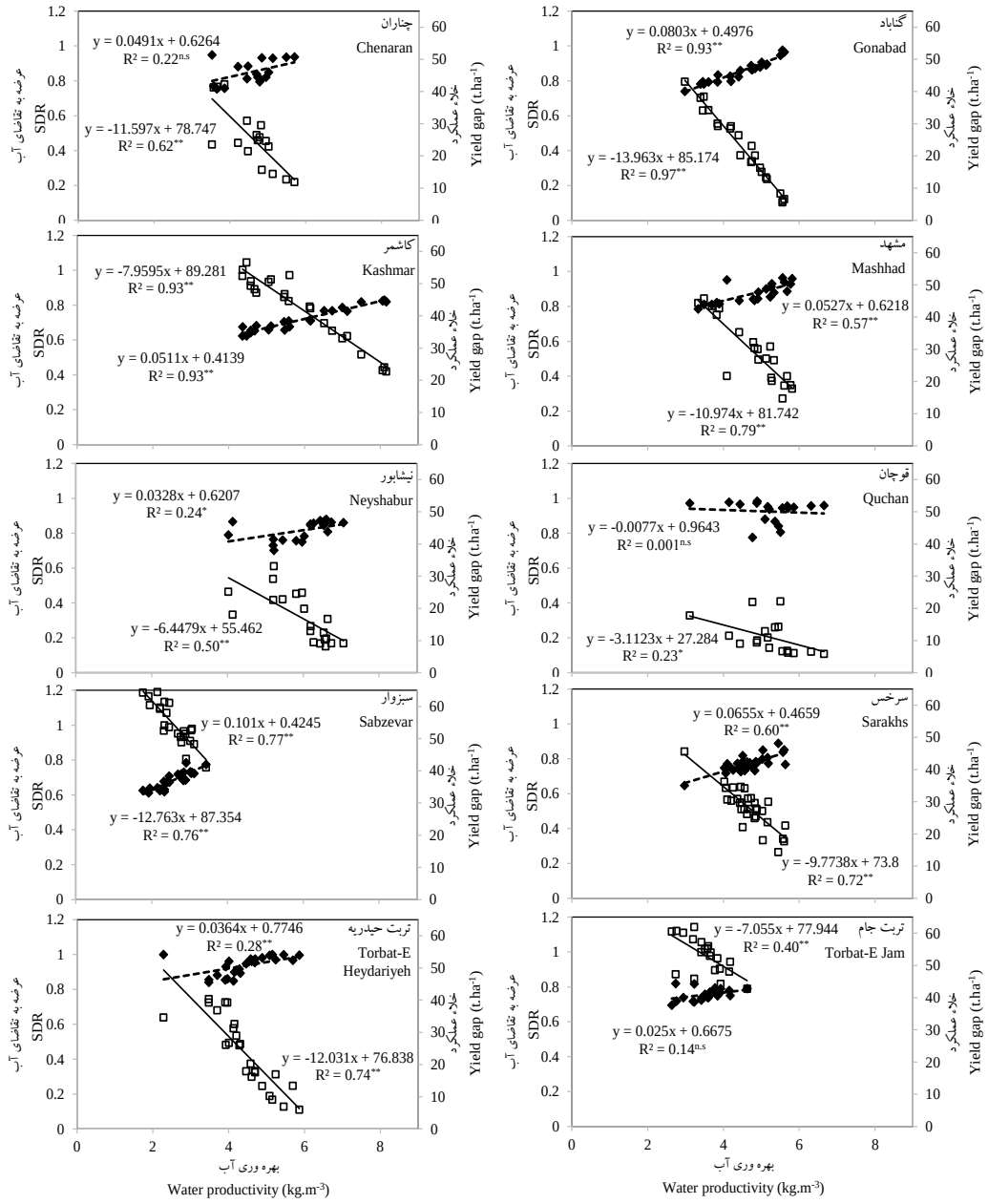
وضعیت شاخص عرضه به تقاضا در شرایط واقعی در شهرستان‌های مختلف با توجه به مدیریت آبیاری متغیر بود (شکل ۳). در تمام شهرستان‌ها مقدار این شاخص در ابتدای فصل رشد برابر با یک بود که این موضوع به‌دلیل نیاز آبی پایین گیاه چغندرقند در مراحل ابتدایی رشد است. مقدار این شاخص در ادامه فصل رشد و با گرم شدن هوا (از اواخر خرداد تا اواسط تیر بسته به شهرستان) کاهش یافت که شدت و مدت این روند نزولی در شهرستان‌های مختلف و با توجه به وضعیت آبیاری‌ها (تعداد و فواصل آبیاری)، ظرفیت نگهداری آب خاک و دمای هوا در ماه‌های گرم (تیر، مرداد و شهریور) در هر شهرستان شرایط متفاوتی داشت. بعنوان مثال در شهرستان تربت حیدریه میزان شاخص عرضه به تقاضای آب در مقایسه با سایر شهرستان‌ها وضعیت بهتری داشت که به دلیل بیشتر بودن تعداد دفعات آبیاری (۱۹ مرتبه، جدول۲)، دمای نسبتا خنک‌تر در ماه‌های گرم سال (۲۴ درجه سانتی‌گراد) و ظرفیت بالای نگهداری آب خاک (۲۵۰ میلی‌متر، جدول ۲) در این شهرستان نسبت به سایر شهرستان‌ها بود. وضعیت این شاخص در شهرستان‌های سبزوار، تربت جام و کاشمر بسیار نامطلوب بود و تا پایان فصل روند کاهشی نیز داشت. این موضوع نشان دهنده تنش شدید رطوبتی در این شهرستان‌ها بود. مهم‌ترین عامل در وقوع تنش خشکی در شهرستان کاشمر کم بودن تعداد دفعات آبیاری (۹ مرتبه، جدول ۲) و در شهرستان‌های سبزوار و سرخس بالا بودن میانگین دمای بالای (کمبود فشار بخار بالای هوا) در ماه‌های گرم سال (به‌ترتیب ۲۸/۸ و ۲۷/۸ درجه سانتی‌گراد) در مقایسه با سایر شهرستان‌ها بود.

در شرایط محدودیت آب، روند شاخص عرضه به

تقاضا نیز در شهرستان‌های مختلف با توجه به وضعیت آبیاری در هر شهرستان، متفاوت بود. مقدار این شاخص از ابتدای فصل رشد تا اواسط اردیبهشت برابر با یک بود و با توجه به رشد گیاه و افزایش نیاز آبی آن، از اواسط اردیبهشت تا اوایل خرداد، مقدار این شاخص شروع به کاهش نمود که روند آن در شهرستان‌های مورد بررسی تقریبا مشابه شرایط واقعی بود. بعنوان مثال مقدار این شاخص در شرایط محدودیت آب در شهرستان تربت حیدریه بهتر از سایر شهرستان‌ها بود و در شهرستان‌های سبزوار، تربت جام و کاشمر وضعیت نامطلوب‌تری داشت که نشان دهنده تنش رطوبتی بالا در مزارع چغندرقند این شهرستان‌ها بود (شکل ۳). البته بر اساس شکل ۳ این شاخص در شرایط محدودیت آب در مقایسه با شرایط واقعی، مقدار کمتری داشت که نشان‌دهنده نیاز آبی بیشتر چغندرقند در شرایط محدودیت آب بود. این نیاز آبی بالاتر به‌دلیل میزان تولید زیست توده بیشتر در شرایط محدودیت آب نسبت به شرایط واقعی بود. این موضوع به‌دلیل استفاده بهتر گیاه از منابع محیطی به‌واسطه تاریخ کشت مناسب‌تر و استفاده بهتر از بارش‌های بهاره و در نتیجه بسته شدن سریع‌تر پوشش گیاهی و همچنین طول بیشتر فصل رشد بود که باعث دوام سطح برگ بیشتر در شرایط محدودیت آب نسبت به شرایط واقعی بود. این نتایج با وضعیت بهره‌وری آبی در شرایط محدودیت آب و همچنین میزان خلاء عملکرد ناشی از محدودیت آب مطابقت داشت. بعنوان مثال در شهرستان‌های سبزوار و تربت جام با بیشترین خلاء عملکرد ناشی از محدودیت آب (به‌ترتیب ۵۴/۳۵ و ۵۱/۵۲ تن در هکتار) و همچنین کمترین مقدار بهره‌وری آبی در شرایط محدودیت آب (به‌ترتیب ۲/۵۹ و ۳/۵ کیلوگرم بر مترمکعب)، شاخص عرضه به تقاضای آب در شرایط محدودیت آب در بدترین وضعیت در مقایسه با سایر شهرستان‌ها قرار داشتند. نتایج ارزیابی ارتباط بین بهره‌وری آبی چغندرقند با شاخص عرضه به تقاضای آب در شرایط محدودیت آب و همچنین خلاء عملکرد ناشی از محدودیت آبی در سال‌های مختلف، نشان دهنده ارتباط معنی‌دار بین این عوامل در اغلب شهرستان‌ها بود. با توجه به نتایج ارائه شده در شکل ۴ ارتباط بین شاخص عرضه به تقاضای آب و بهره‌وری آب در شرایط محدودیت آب تنها در سه شهرستان تربت جام، قوچان و چناران ارتباط معنی‌داری نداشت. ارتباط این دو عامل در شهرستان نیشابور در سطح پنج درصد (ضریب تبیین ۲۴ درصد) و در شش شهرستان دیگر در سطح یک درصد (ضریب تبیین ۲۸ تا ۹۳ درصد) معنی‌دار و مستقیم بود. ارتباط بهره‌وری آبی در شرایط محدودیت آب با خلاء عملکرد ناشی از محدودیت آب نیز در کلیه شهرستان‌ها معنی‌دار و معکوس (معنی‌دار در سطح پنج درصد در شهرستان قوچان با ضریب تبیین ۲۳ درصد و معنی‌دار در سطح یک درصد در سایر شهرستان‌ها با ضریب تبیین ۴۰ تا ۹۷ درصد) بود (شکل ۴).

نتیجه‌گیری

نتایج این تحقیق نشان داد که میزان خلاء عملکرد در مزارع چغندرقند ۱۰ شهرستان مورد بررسی در استان خراسان رضوی بسیار بالا بود، به طوری که عملکرد بدست آمده توسط کشاورزان تنها یک سوم عملکرد قابل دستیابی را در بر داشت. نتایج بررسی‌ها نشان داد که سهم محدودیت آبی در ایجاد خلاء عملکرد بسیار بالا بود، به طوری که در حدود نیمی از خلاء عملکرد چغندرقند در این شهرستان‌ها به‌دلیل محدودیت در تامین آب مورد نیاز گیاه بود. اثر محدودیت آب در خلاء عملکرد چغندرقند در استان خراسان رضوی به دلیل عدم وجود آب کافی جهت تامین نیاز آبی بالای این گیاه در طول فصل رشد، به‌ویژه در روزهای گرم سال و همچنین مدیریت نامناسب آبیاری جهت رسیدن به بهترین مقدار تولید با همین مقدار آب در دسترس است.



شکل ۴- ارتباط بین بهره وری آب با نسبت عرضه به تقاضای آب (SDR) (علائم سیاه) و بین بهره وری آب با خلاء عملکرد (علائم سفید) در شرایط محدودیت آب در گیاه چغندرقند در ۱۰ شهرستان استان خراسان رضوی

Fig. 4. Relationship between water productivity and Supply-Demand ratio (SDR) (black signs) and between water productivity and yield gap (white signs) in water-limited condition in sugar beet in 10 counties in Khorasan Razavi province, Iran

ارزیابی بهره‌وری آبی چغندرقند در شرایط واقعی کشاورزان هر شهرستان نشان دهنده بهره‌وری بسیار پایین آب در مزارع چغندرقند در استان خراسان رضوی (۳/۱۵- ۱/۸ کیلوگرم ریشه به ازای مترمکعب آب مصرفی) بود. این موضوع نشان‌دهنده عدم استفاده موثر از آب آبیاری توسط کشاورزان در تولید این محصول است. بررسی شاخص عرضه به تقاضای آب در شهرستان‌های مختلف استان نیز نشان دهنده شرایط

رطوبتی مختلفی بود. بررسی روند این شاخص نشان داد که در برخی از مناطق کشاورزان با اجرای آبیاری بیشتر، سعی در ممانعت از وقوع تنش در طول فصل رشد داشتند که در برخی موارد با مصرف آب بیشتر در کنترل تنش خشکی نیز موفق بودند. هرچند که مصرف آب بیشتر در شهرستان‌های گناباد و تربت حیدریه تنها باعث کاهش بهره‌وری آب در تولید چغندرقند در شرایط واقعی شد. این نتایج نشان دهنده نیاز به زمان‌بندی صحیح و دقیق آبیاری گیاه با توجه به نیاز گیاه و ظرفیت نگهداری آب خاک و همچنین توجه همزمان به بهره‌وری آب و شاخص عرضه به تقاضای آب و شناسایی نقاط ضعف مدیریت آبیاری است. علاوه بر مدیریت آبیاری، استفاده از روش‌های مناسب به‌زراعی و به‌نژادی جهت افزایش عملکرد چغندرقند در مزارع استان و همچنین استفاده کارآمدتر از آب نیز ضروری است.

منابع مورد استفاده References

Alizadeh, A. and A. Keshavarz. 2005. Status of Agricultural Water Use in Iran. p. 94-105. In Anonymous. (Eds.) Water Conservation, Reuse, and Recycling: Proceedings of an Iranian–American Workshop. Washington, DC. The National Academies Press. doi: 10.17226/11241.,

Anonymous, 2018. Agriculture Statistics. Volume 1: Crops. Ministry of agriculture, Planning and Economic Affairs, Office of Statistics and Information Technology. (In Persian).

Chauhan, Y., S. Allard, R. Williams, B. Williams, S. Mundree, K. Chenu and N. C. Rachaputi. 2017. Characterization of chickpea cropping systems in Australia for major abiotic production constraints. Field Crops Res. 204: 120-134.

Dehghan, H., A. Alizadeh, H. Ansari and S. A. Haghayeghi Moghaddam. 2011. Evaluation of water productivity indicators in wheat irrigated fields (Case study: Neyshabour plain). Iran. J. lrrig. Drain. 2(5): 263-275. (In Persian with English abstract).

Deihimfard, R., M. Nassiri Mahallati and A. Koocheki. 2011. SUCROSBEET: A simple model for simulating growth and development of sugar beet under potential and nitrogen-limited conditions. J. Agroecol. 2(1): 1-20. (In Persian with English Abstract).

Deihimfard, R., M. Nassiri Mahallati and A. Koocheki. 2015. Yield gap analysis in major wheat growing areas of Khorasan province, Iran, through crop modeling. Field Crops Res. 184: 28-38.

El-Marsafawy, M. S., A. Swelam and A. Ghanem. 2018. Evolution of crop water productivity in the Nile delta over three decades (1985–2015). Water, 10(1168): 1-12.

Espe, M. B., K. G. Cassman, H. S. Yang, N. Guilpart, P. Grassini, J. Van Wart, M. Anders, D. Beighley, D. Harrell, S. Linscombe, K. McKenzie, R. Mutter, , L. T. Wilson and B. A. Linquist. 2016. Yield gap analysis of US rice production systems shows opportunities for improvement. Field Crops Res. 196: 276–283.

FAO. 2012. World agriculture towards 2030/2050. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Rome. Italy.

Ghasemi Nezhad Raeini, M., S. Marofi, M. Zare Kohan and A. Maleki. 2014. Investigation of water

efficiency index and its comparison with the actual conditions of wheat farms. Irrig. Sci. Engin. 38(1): 71-77. (In Persian with English Abstract).

Jabro, J. D., W. B. Stevens, W. M. Iverson, R. G. Evans and B. L. Allen. 2014. Crop water productivity of sugar beet as affected by tillage. Agron. J. 106: 2280-2286.

Keshavarz, A. and H. Dehghani Sanij. 2011. Water productivity index and solutions for future agricultural activities in Iran. Economic Strategy. 1(1): 199-233. (In Persian with English abstract).

Mandare A. B., S. K. Ambast, N. K. Tyagi and J. Singh. 2008. On-farm water management in saline groundwater area under scarce canal water supply condition in the Northwest India. Agric. Water Manage. 95: 516-526.

Molden, D., T. Oweis, P. Steduto, P. Bindraban, M. A. Hanjra and J. Kijne. 2010. Improving agricultural water productivity: between optimism and caution. Agric. Water Manage. 97(4): 528-535.

Qiu, G. Y., L. M. Wang, X. H. He, X. Y. Zhang, S. Y. Chen, J. Chen and Y. H. Yang. 2008. Water use efficiency and evapotranspiration of winter wheat and its response to irrigation regime in the north China plain. Agric. Forest Meteorol.148: 1848-1859.

Rahnama, M. R. and L. Shaddel. 2015. Evaluation of sustainability and the optimal population based on water resources in Mashhad. Geography Urban Plan. Res. 3(2): 123-143 (In Persian with English abstract).

Sahin, U., S. Ors, F. M. Kiziloglu and Y. Kuslu. 2014. Evaluation of water use and yield responses of drip-irrigated sugar beet with different irrigation techniques. Chilean J. Agric. Res. 74 (3): 302–310.

Saini, K. S. and N. S. Brar. 2018. Crop and water productivity of sugar beet (*Beta vulgaris*) under different planting methods and irrigation schedules. Agric. Res. 7(1): 93-97.

Saxton, K. E. and P. H. Willey. 2006. The SPAW Model for Agricultural Field and Pond Hydrologic Simulation. *In:* Singh, V. P. and D. Frevert. (Eds.) Watershed Models. CRC Press, Taylor and Francis Group, LLC, pp. 400–435.

Spitters, C. J. T. H. Van Keulen and D. W. G. Van Kraalingen. 1989. A Simple and Universal Crop Growth Simulator: SUCROS87. *In:* Rabbinge *et al.* (Eds.) Simulation and Systems Management in Crop Protection. Simulation Monograph, vol. 32. Pudoc, Wageningen. The Netherlands, pp. 147-181.

Tatari, M. 2008. Dryland wheat yield prediction using climatic and edaphic data by applying neural networks. PhD Dissertation. Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran. (In Persian with English abstract).

Van Ittersum, M. K., K. G. Cassman, P. Grassini, J. Wolf, P. Tittonell and Z. Hochman. 2013. Yield gap analysis with local to global relevance- A review. Field Crops Res. 143: 4–17.

Van Laar, H. H., J. Goudriaan and H. Van Keulen. 1997. SUCROS97: Simulation of Crop Growth for Potential and Water-limited Production Situations. Quantitative Approaches in Systems Analysis, No. 14. C.T. de Wit Graduate School for Production Ecology and Resource Conservation, Wageningen, The Netherlands.

Vazifedoust, M., J. C. Van Dam, R. A. Feddes and M. Feizi. 2008. Increasing water productivity of irrigated crops under limited water supply at field scale. Agric. Water Manage. 95: 89-102.

Wang, J., E. Wang, H. Yin, L. Feng and J. Zhang. 2014. Declining yield potential and shrinking yield gaps of maize in the North China Plain. Agric. Forest Meteorol. 195: 89-101.

Assessment of water productivity and supply:demand ratio index in sugar beet (*Beta vulgaris* L.) in Khorasan Razavi province, Iran using growth simulation models

Mohammadi-Ahmadmahmoudi, E.[1], R. Deihimfard[2] and O. Noori[3]

ABSTRACT

Mohammadi-Ahmadmahmoudi, E., R. Deihimfard and O. Noori. 2019. Assessment of water productivity and supply:demand ratio index in sugar beet (*Beta vulgaris* L.) in Khorasan Razavi province, Iran using growth simulation models. **Iranian Journal of Crop Sciences. 21(3):268-286 (In Persian).**

The rapid population growth and the need for more agricultural production necessitate more attention to water shortage and enhancing water productivity. To assess water productivity and supply:demand ratio index in sugar beet, this experiment was carried out using SUCROS growth simulation model. Long-term climatic data and collecting questionnaires from farmers were used to assessing water productivity in sugar beet agroecosystems in 10 counties of Khorasan Razavi province, Iran and investigating the role of water management in water productivity and drought stress conditions in sugar beet. Results of long-term simulations showed that the actual yield (33.5 $t.ha^{-1}$) by farmers was only one-third of the attainable yield (97.3 $t.ha^{-1}$) of sugar beet in the targted areas. Forty eight percent of this yield gap was due to water constraints. The results indicated the low productivity (1.5-1.8 kg root m^{-3}) of sugar beet in the targeted areas. The results also showed that inappropriate irrigation management, despite the high water consumption in some counties, led to decrease in water productivity and occurance of drought stress during the growing season. Results also showed a positive and significant relationship between water productivity and supply:demand ratio index in different locations. The index, over growing season, in different counties was highly depended on water management, air temperature (particularly during warmer months of the year) and soil water holding capacity. These results indicated the need for a more scientific attention to appropriate irrigation schedules according to the plant water requirement and soil water retention capacity during the warm seasons to meet the moisture requirement of sugar beet.

Key words: Irrigation schedule, SUCROS Simulation model, Sugar beet and Yield gap.

Received: December, 2018 Accepted: July, 2019

1. PhD Student, Environmental Sciences Research Institute, Shahid Beheshti University, G.C., Tehran, Iran
2. Assistant Prof., Environmental Sciences Research Institute, Shahid Beheshti University, G.C., Tehran, Iran (Corresponding author) (Email: deihim@sbu.ac.ir, deihimfard@gmail.com)
3. Assistant Prof., Environmental Sciences Research Institute, Shahid Beheshti University, G.C., Tehran, Iran