

خودکارکردن سیستم آبیاری تحت فشار با استفاده از دمای پوشش سبز گیاه

وحیدرضا وردی نژاد^۱، عبدالمجید لیاقت^۲ و حامد ابراهیمیان^۳

چکیده

با گسترش سطح زیر کشت اراضی آبیاری تحت فشار، خودکار کردن سیستم‌های مختلف آبیاری بخصوص سیستم‌های متحرک (سنتریوت و لاینر موو) که دارای قابلیت‌های بیشتری برای خودکار شدن هستند، اهمیت فوق العاده ای دارد. زیرا علاوه بر کاهش نیروی کارگری، موجب افزایش کارایی مصرف آب و عملکرد محصول می‌شود. از آنجا که اولین تاثیر کمبود رطوبت در خاک، بلافاصله در خود گیاه ظاهر می‌شود، لذا تعیین زمان آبیاری بر اساس شاخص گیاهی مثل دمای پوشش سبز گیاه (Canopy Temperature) یا پتانسیل آب برگ که وضعیت آبی گیاه را نشان می‌دهد، در مقایسه با روشهای غیر مستقیم (از قبیل رطوبت خاک، مکش خاک بوسیله تانسومتر و ...) دقیق تر می‌باشد. حتی در مواردی ممکن است رطوبت موجود در خاک زیاد باشد ولی به دلایلی مانند شوری آب یا خاک، این رطوبت برای گیاه قابل استفاده نباشد که این تنش بلافاصله توسط شاخص‌های گیاهی نمایان می‌شود. برای تعیین زمان آبیاری بر اساس دمای پوشش سبز، روشهای مختلفی وجود دارد که کاربردی ترین آنها روش زمان-دمای آستانه (TTT: Temperature-Time Threshold) می‌باشد که به کمک دماسنج‌های مادون قرمز به راحتی قابل اندازه گیری است. روشهای دیگری نیز برای تعیین زمان آبیاری از قبیل: شاخص تنش آبی گیاه (CWSI) و شاخص تنش حرارتی روزانه (TSD) وجود دارند. تحقیقی در مزرعه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی کرج در قالب طرح بلوکهای کامل تصادفی در سه تکرار در سال ۸۳ به منظور تعیین این شاخصها برای گیاه ذرت انجام شد. بدین منظور پنج تیمار آبیاری شامل تیمار مرطوب (نگهداری رطوبت در حد FC) و چهار تیمار تحت تنش بصورت تخلیه رطوبت تا حد PWP در چهار مرحله رشدی گیاه شامل مراحل استقرار، رویشی، گلدهی و پرشدن دانه در نظر گرفته شد. پارامترهای اندازه گیری شده شامل دمای تر و خشک هوا، دمای پوشش سبز گیاه، رطوبت نسبی، رطوبت عمق توسعه ریشه، فشار بخار هوا در ساعت حداکثر تعرق (ساعت ۱۴ تا ۱۵) بودند. در این مقاله تنظیم آهنگ حرکت و کنترل سنتریوت نیز مورد بررسی قرار گرفته است تا دستگاه سنتریوت با توجه به نیاز آبی گیاه

^۱ - دانشجوی دکتری آبیاری و زهکشی گروه مهندسی آبیاری و آبادانی دانشگاه تهران

^۲ - دانشیار گروه مهندسی آبیاری و آبادانی دانشگاه تهران

^۳ - دانشجوی کارشناسی ارشد آبیاری و زهکشی گروه مهندسی آبیاری و آبادانی دانشگاه تهران

بصورت خودکار کنترل گردد. همچنین، با جمع بندی مطالعات صورت گرفته در این زمینه، روش برنامه ریزی آبیاری خودکار سنتریپوت (روش زمان دمای آستانه) با آبیاری کنترل شده بصورت دستی (با اندازه گیری مقدار آب خاک توسط پروبهای نوترونی) مقایسه شده است. کاهش هزینه‌های کارگری، سهولت بهره برداری، افزایش راندمان آبیاری و عملکرد محصول می‌تواند بکار گیری این روش را توجیه نماید.

کلمات کلیدی: برنامه ریزی آبیاری، سنتریپوت، خودکار سازی، دمای پوشش سبز

مقدمه

با پیشرفت سریع تکنولوژی، خودکار کردن سیستمهای مختلف آبیاری بخصوص سیستم های متحرک نظیر سنتریپوت و لینیرموو که جزو سیستم های در حال حرکت (Continues Move) بوده و دارای قابلیت های بیشتری برای خودکار شدن هستند، اهمیت فوق العاده ای دارد. زیرا علاوه بر کاهش نیروی کارگری عملکرد محصول نیز افزایش می‌یابد. روشهای مختلفی برای تعیین زمان مناسب آبیاری وجود دارد که عبارتند از: شاخصهای خاک، بیان آبی و شاخصهای گیاهی. برنامه ریزی شاخصهای گیاهی روشی مستقیم برای تعیین زمان آبیاری می‌باشد زیرا اولین تاثیر کمبود رطوبت در خاک بلافاصله در خود گیاه ظاهر می‌شود. شاخصهای گیاهی برای تعیین زمان آبیاری عبارتند از: شاخص رشد گیاه، شاخص پتانسیل آب برگ، شاخص مقاومت روزنه ای و شاخص دمای برگ. تعیین پتانسیل آب در برگ احتیاج به دقت زیادی دارد، زیرا پتانسیل آب برگ شدیداً تحت تاثیر محل قرار گرفتن و سن برگ و تشعشع دریافتی است، لذا این روش گسترش چندانی نیافته است. از آنجا که مقاومت روزنه ای بیان کننده درجه باز بودن روزنه ها و شدت تبخیر و تعرق می‌باشد، می‌تواند یکی دیگر از شاخصهای وضعیت آب در گیاه باشد. لیکن داشتن مهارت کافی برای اندازه گیری و تفسیر مقاومت روزنه ای و نیز صرف زمان زیاد برای اندازه گیری، کاربرد این روش را در اهداف تحقیقاتی محدود کرده است. شاخص سوم نشان دهنده تنش در گیاه، دمای پوشش سبز گیاه می‌باشد. می‌دانیم تبخیر یک فرآیند انرژی خواه است و انرژی لازم جهت تبخیر و تعرق از طریق تشعشع خورشیدی تامین می‌گردد. در طی عمل تعرق، گیاه آب را از محیط خاک جذب نموده و از طریق آوندهای چوبی به روزنه ها می‌رساند و آب بصورت بخار از گیاه خارج می‌شود. انرژی لازم برای تبخیر هر گرم آب ۵۸۵ کالری می‌باشد لذا در هنگام تعرق، آب سلولهای زیر روزنه ها از محیط اطراف انرژی کسب نموده و تبخیر می‌گردد و در نتیجه دمای پوشش سبز کاهش پیدا می‌کند. در صورتی که مقدار رطوبت خاک کم باشد و گیاه آب کافی در اختیار نداشته باشد در این صورت در اثر عدم تناسب بین عمل تعرق و جذب آب توسط ریشه ها، میزان مکش آب در آوندهای چوبی بالا رفته و باعث بسته شدن روزنه ها و کاهش عمل تعرق می‌گردد که نتیجه آن بصورت افزایش دمای پوشش سبز ظاهر می‌شود. دمای پوشش سبز تحت تاثیر عواملی از قبیل باد، رطوبت نسبی هوا، تشعشع دریافتی و بخصوص رطوبت موجود در خاک می‌باشد و با دماسنج مادون قرمز بطور دقیق قابل اندازه گیری است. گاردنر و همکاران (۱۹۷۹) بیان داشتند که اختلاف دمای پوشش گیاهی و هوا در طول روز افزایش پیدا می‌کند و در ساعت ۱۳ الی ۱۴ به حداکثر مقدار خود می‌رسد. ایدسو و همکاران (۱۹۷۷) اختلاف دمای پوشش گیاهی و هوا را که بوسیله دماسنج مادون قرمز اندازه گیری شده بود، به عنوان شاخصی از وضعیت آبی گیاه بکار بردند. آنها به این

نتیجه رسیدند که زمانی که گیاه کمبود آب نداشته باشد، اختلاف دمای پوشش گیاهی (T_{canopy}) و هوا (T_{air}) منفی می‌باشد ($\Delta T = T_c - T_a < 0$) ولی زمانی که گیاه تحت تنش آبی شدید باشد اختلاف دمای پوشش گیاهی و هوا مقداری مثبت می‌گردد ($\Delta T = T_c - T_a > 0$). سومایو و همکاران (۱۹۸۰) نشان دادند که کمبود رطوبت خاک باعث افزایش دمای برگ گیاه می‌شود. جونز (۱۹۹۹) دمای پوشش گیاه را که با دماسنج مادون قرمز اندازه‌گیری کرده بود، به عنوان روشی برای میزان باز شدگی روزنه‌های گیاه لوبیا و برای اندازه‌گیری تنش گیاه در برنامه ریزی آبیاری در مناطق مرطوب استفاده کرد. ال‌درفاسی و نیلسن (۲۰۰۱) دمای پوشش سبز گیاه را برای ارزیابی شاخص تنش رطوبتی در تعیین وضعیت آب و برنامه‌ریزی آبیاری در گندم استفاده کردند. بورک و الیور (۱۹۹۳) نشان دادند که آنزیم‌های گیاه در یک رنج دمایی محدود بنام پنجره جنبش گرمایی فعالیت می‌کنند. وانجورا (۱۹۹۵) نشان داد که از این پنجره یا دمای آستانه، میتوان به عنوان معیاری برای خودکار ساختن سیستم آبیاری استفاده کرد. آپچرچ و همکاران در سال ۱۹۹۶ به یک سیستم مدیریت آبیاری دست یافتند که بر مبنای دمای بهینه فعالیت آنزیم‌های برگ عمل می‌کرد. آنها در مورد شرایط آب و هوایی مربوط به زمان آستانه نیز به نتایجی رسیدند. این روش که برای برنامه ریزی آبیاری کاربرد دارد، روش زمان دمای آستانه (Time-Temperature Threshold : TTT) نامیده می‌شود. اوت و همکاران (۱۹۹۹ و ۲۰۰۰) ثابت کردند که پلاتهای آبیاری شده به روش قطره‌ای که در آنها آبیاری بصورت خودکار بر اساس روش زمان دمای آستانه انجام گردیده در مقایسه با برنامه ریزی غیر خودکار و بر اساس پروبهای نوترونی، از عملکرد بیشتری برخوردار بود. روشهای دیگری نیز برای برنامه ریزی آبیاری بر اساس دمای پوشش سبز از قبیل: شاخص تنش آبی گیاه ($CWSI^4$) و تنش حرارتی روزانه (TSD^5) وجود دارند ولی برای محاسبه این شاخصها علاوه بر دمای پوشش سبز گیاه، اندازه‌گیری دمای تر و خشک هوا، رطوبت نسبی، رطوبت عمق توسعه ریشه، فشار بخار هوا و تشعشع خالص نیز نیاز است لذا برنامه ریزی بر اساس برخی از این شاخصها ممکن است عملی نباشد ولی روش زمان دمای آستانه نیازمند پارامترهای ذکر شده نمی‌باشد. برای خودکار سازی سیستم سنتریپوت کارهایی در چند سال اخیر صورت گرفته است. یکی از این تحقیقات توسط لتبریچ در موسسه CACDI (Canada Alberta Crop Development Initiative) صورت گرفته است. این پروژه حالت‌های مختلف مقدار رطوبت خاک (توسط سنسورهای رطوبتی تعبیه شده در خاک) و یک سیستم ارتباطی کنترل از دور را بررسی نموده است. تحقیقی نیز برای خودکار سازی سیستم سنتریپوت توسط آپچرچ (۱۹۹۸) با نصب دماسنج مادون قرمز روی این سیستم انجام شد. در این مقاله امکان خودکار سازی سیستم سنتریپوت بر اساس روشهای مختلف تشریح گردیده و یک تحقیق که توسط (USDA) در بوشلند تگزاس صورت گرفته، بصورت مفصل تشریح شده است.

مواد و روش‌ها

تحقیقی در مزرعه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی کرج در قالب طرح بلوکهای کامل تصادفی در سه تکرار در سال ۸۳ به منظور تعیین شاخصهای برنامه ریزی آبیاری برای گیاه ذرت انجام شد. به این منظور پنج تیمار آبیاری شامل تیمار مرطوب (نگهداری رطوبت در حد FC) و چهار تیمار تحت تنش بصورت تخلیه رطوبت تا حد PWP

⁴- Crop Water Stress Index

⁵- Temperature Stress Day

در چهار مرحله رشدی گیاه شامل مراحل استقرار، رویشی، گلدهی و پرشدن دانه در نظر گرفته شد. پارامترهای اندازه گیری شده شامل دمای تر و خشک هوا، دمای پوشش سبز گیاه، رطوبت نسبی، رطوبت عمق توسعه ریشه، فشار بخار هوا و تشعشع خالص در ساعت حداکثر تعرق (ساعت ۱۴ تا ۱۵) بود.

برنامه ریزی بر اساس شاخص تنش آبی گیاه (CWSI) به روش ایدسو

شاخص تنش آبی گیاه یکی از شاخص‌هایی است که وضعیت آب در گیاه را بر اساس اختلاف درجه حرارت پوشش گیاهی و هوا بیان می‌کند. برای تشریح آن ایدسو رابطه خطی بین اختلاف دمای هوا و پوشش سبز گیاهی و کمبود فشار بخار هوا بصورت زیر ارائه داد:

$$T_c - T_a = a + b \times (AVPD) \quad (1)$$

دمای هوا و پوشش سبز بر حسب درجه سانتی گراد و کمبود اشباع (AVPD) بر حسب میلی بار بوده و a, b نیز ضرایب ثابت رگرسیون هستند. خطی که مطابق معادله بالا برای هر گیاه بدست می‌آید، مشخص کننده مکان هندسی نقاطی است که در آن نقاط میزان تبخیر و تعرق حداکثر می‌باشد. این خط تحت عنوان خط مبنای پایین^۶ یا خط مبنای بدون تنش^۷ نامیده می‌شود. حال اگر مقدار آب در منطقه ریشه کم شود در این صورت دمای گیاه افزایش می‌یابد و در نقطه ای بالاتر از خط مبنای پایینی قرار می‌گیرد. در نقطه ای عمل تبخیر و تعرق گیاه تقریباً متوقف می‌شود که خط مبنای بالایی نامیده می‌شود. موقعیت خطوط مبنای پایین و بالا بر اساس تیمار مرطوب و خشک به ترتیب بصورت معادلات (۲) و (۳) بدست آمد. در شکل (۱) موقعیت خط مبنای پایین و بالا به روش ایدسو ارائه شده است.

$$(T_c - T_a)_{LL} = -0.1642 \times (AVPD) + 1.6098 \quad (2)$$

$$T_c - T_a = 3/39 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (3)$$

رابطه بین (CWSI) و شدت تبخیر و تعرق و حساسیت مراحل مختلف رشد گیاه به کم آبی (فاکتور حساسیت گیاه: CS) بصورت معادلات زیر بیان می‌شود:

$$CWSI = 1 - \frac{ET}{ET_p} \text{ و } CS_i = 1 - \frac{Y_i}{Y_p} \quad (4)$$

که در آن ET, ET_p به ترتیب تبخیر و تعرق پتانسیل و واقعی گیاه و (Y_p) عملکرد پتانسیل و (Y_i) عملکرد تیماری که در مرحله رشد ۱ آن تنش آبی اعمال شده است. رابطه بین کاهش نسبی عملکرد محصول و کاهش نسبی تبخیر و تعرق بصورت رابطه زیر می‌باشد:

$$(1 - \frac{Y}{Y_p}) = K_y (1 - \frac{ET}{ET_p}) \quad (5)$$

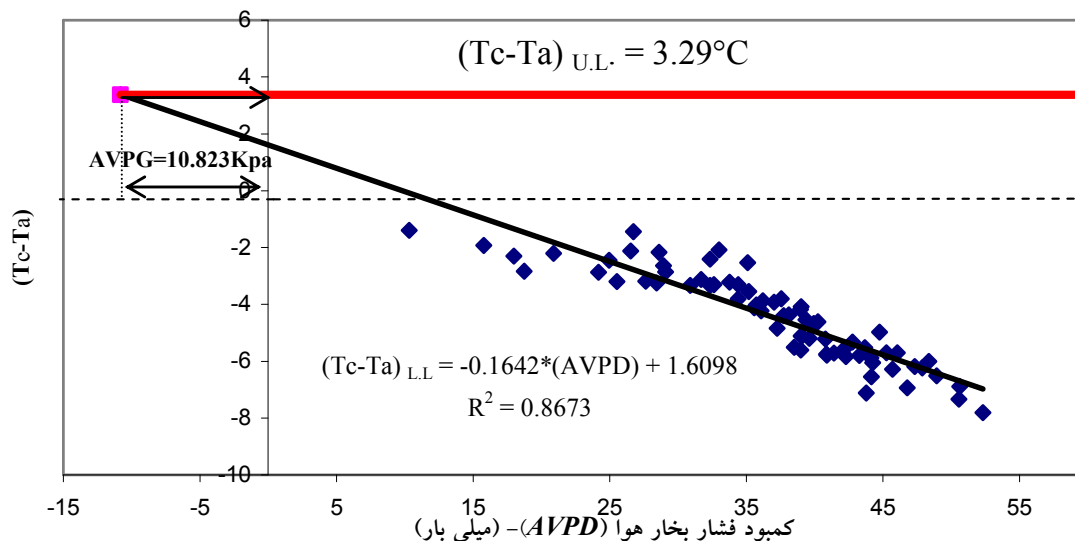
در آن K_y ضریب حساسیت به کم آبی می‌باشد. با ادغام دو رابطه ۴ و ۵ رابطه ۶ حاصل می‌شود.

$$CS = K_y \times (CWSI) \quad (6)$$

⁶ - Lower Limit Baseline

⁷ - Non - Stressed Baseline

مقادیر (CS) برای ذرت برای دوره رویشی، ظهور کاکلها و کامل شدن تاج گل تا مرحله خمیری و مرحله بعد از خمیری بترتیب برابر ۰/۲۵، ۰/۵ و ۰/۲۱ می‌باشد. مقادیر (K_y) برای این سه دوره به ترتیب برابر ۰/۴، ۱/۵ و ۰/۵



شکل ۱: موقیت خط مبنای پایین و بالا برای گیاه ذرت به روش ایدسو

است. بر اساس معادله (۶) مقادیر بحرانی (CWSI) برای مراحل فوق ۰/۶۳، ۰/۳۳ و ۰/۴۲ بدست می‌آید لذا معادلات تعیین زمان آبیاری بر اساس اختلاف دمای پوشش سبز و هوا برای سه دوره مختلف رشد بصورت زیر می‌باشد:

$$(T_c - T_a)_c = -0.0619(AVPD) + 2.68 \quad \text{مرحله (۱)} \quad (۷)$$

$$(T_c - T_a)_c = -0.1093(AVPD) + 2.17 \quad \text{مرحله (۲)} \quad (۸)$$

$$(T_c - T_a)_c = -0.0949(AVPD) + 2.31 \quad \text{مرحله (۳)} \quad (۹)$$

همانطور که در روابط (۷) تا (۹) مشخص است، برای تعیین شروع حرکت سیستم سنتریپوت ما به سه پارامتر کمبود اشباع، دمای پوشش سبز و هوا نیاز داریم. لذا لازم است که با سنسورهای این سه پارامتر در زمان تنش بحرانی مانیتور شوند.

برنامه ریزی بر اساس شاخص تنش حرارتی روزانه (TSD)

تنش حرارتی روزانه شاخصی کیفی است که اختلاف تعرق بین گیاه خوب آبیاری شده و گیاه تحت تنش را نشان می‌دهد. تنش حرارتی روزانه عبارت از اختلاف درجه حرارت پوشش سبز گیاهی بین تیمار تحت تنش و تیمار بدون تنش می‌باشد و از رابطه (۱۰) بدست می‌آید:

$$T_c, T_c^* \quad TSD = T_c - T_c^* \quad (۱۰)$$

به ترتیب دمای تیمار بدون تنش و تیمار تحت تنش می‌باشد. برای این منظور در تخلیه‌های رطوبتی مختلف خاک (SMD) بر حسب درصد، مقادیر تنش حرارتی روزانه بصورت رابطه (۱۱) بدست آمد:

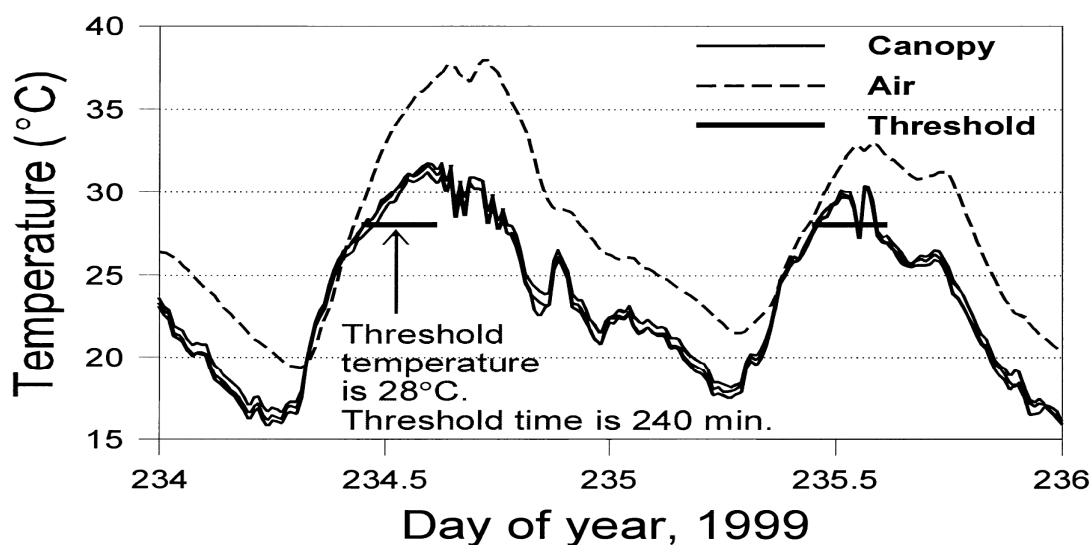
$$TSD = 0.1052 \times (SMD) - 5.06, R^2=0.93 \quad (11)$$

خودکاری سازی سیستم بر اساس این شاخص نسبتاً عملی‌تر است. برای هر مقدار رطوبت موجود در خاک، تنش حرارتی روزانه مقدار مشخصی داشته و با داشتن مقادیر دمای تیمار بدون تنش و دمای مزرعه زمان آبیاری مشخص می‌شود. در این روش ممکن است که رطوبت خاک زیاد بوده ولی برای گیاه قابل استفاده نباشد. مثلاً در آبیاری با آب شور و در خاکهای مشکل دار از نظر شوری این حالت اتفاق می‌افتد. بنابراین در این گونه شرایط استفاده از شاخص‌هایی که رطوبت خاک را در نظر گرفته‌اند، نتیجه صحیح به ما نمی‌دهد. در خودکار سازی سیستم بر اساس شاخص تنش حرارتی روزانه، یک تیمار در نظر گرفته خواهد شد که همیشه رطوبت آن در حد ظرفیت مزرعه باشد و دمای آن بر اساس یک دماسنج مادون قرمز به سیستم کنترل مرکزی (بصورت سیستم بی سیم) در زمانهای تعریف شده مخابره می‌شود و دمای پوشش مزرعه بر اساس دماسنج‌های مادون قرمز که بر روی بال سیستم نصب می‌شوند، نیز به سیستم خودکار مخابره می‌شود. بر اساس مدیریت آبیاری (مثلاً تخلیه رطوبت ۵۰ درصد $\approx TSD = 5.46$) هر موقع این اختلاف دما به عدد ۵/۴۵ درجه سانتی گراد رسید، سیستم بطور خودکار شروع به آبیاری می‌کند. اجرای این روش به دلیل اینکه همزمان نیاز به دو دمای پوشش سبز مزرعه و یک تیمار که همیشه بایستی رطوبت خاک آن در حد ظرفیت مزرعه باشد، ممکن است قدری مشکل باشد.

برنامه‌ریزی بر اساس شاخص زمان-دمای آستانه (TTT: Temperature-Time Threshold)

خودکاری سازی سیستم سنتریپوت بر اساس دو روش فوق‌الذکر (شاخص CWSI و TSD) به دلیل اینکه نیازمند پارامترهای زیادی برای تعیین زمان آبیاری می‌باشد، قدری مشکل می‌باشد. در جاهایی میتوان این روش‌ها را بکار برد که یک ایستگاه هواشناسی موجود باشد و بتوان پارامترهای دمای تر و خشک و کمبود اشباع را در هر لحظه تعیین و به سیستم مانیتور کننده مخابره نمود. در حال حاضر در اکثر نقاط دنیا برای خودکاری سازی سیستم سنتریپوت از روش زمان دمای آستانه به دلیل راحتی و عملی بودن استفاده می‌گردد. لذا در ادامه بصورت مفصل به تشریح این روش پرداخته خواهد شد. روش زمان دمای آستانه بر پایه اندازه گیری دمای سایه انداز گیاه بوسیله دماسنج‌های مادون قرمز استوار است. در این مقاله از داده‌های آزمایشگاهی (USDA) در بوشلند تگزاس که دارای سنتریپوت تحقیقاتی با سه برج (Tower) و طول ۱۲۷ متر است، استفاده شده است. آپچرچ و همکاران (۱۹۹۶) بر اساس دمای بهینه فعالیت آنزیمهای برگ به یک دمای آستانه وابسته به اقلیم دست پیدا کردند که زمان-دمای آستانه نامیده می‌شود. در روش زمان-دمای آستانه در هر دقیقه دمای پوشش سبز یکبار اندازه گیری می‌شود. اگر این دمای اندازه گیری شده از دمای آستانه که مشخص می‌باشد، بزرگتر باشد یک دقیقه به زمان اضافه می‌گردد. بنابراین برای هر دقیقه ای که دمای پوشش سبز از دمای آستانه تجاوز نماید، یک دقیقه به مجموع روزانه اضافه می‌گردد. هر موقع که مجموع روزانه از زمان آستانه تجاوز کند، آبیاری صورت می‌گیرد. در شکل (۲) دمای پوشش سبز ذرت و دمای هوا برای دو روز متوالی ملاحظه می‌شود. دمای آستانه ۲۸ درجه سانتی گراد برای زمان آستانه ۲۴۰ دقیقه می‌باشد. یعنی هر موقع دمای پوشش سبز ذرت از دمای آستانه تجاوز کرد در این صورت اگر $\sum_{i=1}^{240} t_i = 240$ گردید، سیستم بطور اتوماتیک با یک سرعت شروع به آبیاری مشخص می‌کند. در عصر روز اول مجموع زمان-دمای

آستانه به ۲۴۰ دقیقه رسیده و آبیاری صورت گرفته است. ولی در روز دوم به حد آستانه نرسیده و آبیاری صورت نگرفته است.



شکل ۲: دمای پوشش سبز ذرت و دمای هوا برای زمان-دمای آستانه ۲۴۰ دقیقه و ۲۸°C

مدل کردن دمای روزانه

مدل‌های مختلفی وجود دارند که بتوان فقط با یکبار اندازه‌گیری دمای پوشش سبز در روز تغییرات دمای پوشش سبز طی روز را پیش بینی کنند. این مدل‌ها نیازمند داده‌های ورودی جزئی آب و هوا به علاوه شناخت کامل از پارامترهای ویژه خاک و گیاه هستند که اندازه‌گیری آنها دشوار است. ساده‌ترین روش جهت تعیین چگونگی تغییر شرایط محیطی در طی روز که تغییرات دمای پوشش سبز را تحت تأثیر قرار می‌دهد، اندازه‌گیری دمای سایه انداز در یک مکان مرجع ثابت است. فرض بر این است که دمای پوشش سبز در قسمت‌های دیگر مزرعه، که ممکن است تحت تنش‌های مختلفی باشد، می‌تواند نسبت به این مرجع با استفاده از اندازه‌گیری دما بصورت یکبار در روز از آن مکانها، مدل گردد. اگر دمای پوشش سبز را قبل از طلوع آفتاب در سراسر زمین یکسان فرض کنیم (T_e) در این صورت:

$$T_{rmt} = T_e + \frac{[(T_{rmt,t} - T_e)(T_{ref} - T_e)]}{(T_{ref,t} - T_e)} \quad (12)$$

که اجزای آن:

T_{rmt} دمای پوشش سبز در محل اندازه‌گیری، T_{ref} دمای پوشش سبز از محل مرجع در همان بازه زمانی یکسان $T_{rmt,t}$ ، $T_{ref,t}$ دمای پوشش سبز اندازه‌گیری شده بصورت یکبار در روز در هر زمانی از روشنایی روز (t) و $T_{ref,t}$ دمای مرجع پوشش سبز اندازه‌گیری شده در همان زمان اندازه‌گیری است.

معادله فوق با داده‌های ۳ سال اندازه‌گیری (۱۹۹۹ تا ۲۰۰۱) تست شده است. در این سه سال، سه محصول ذرت، پنبه و لوبیا کشت شده و برنامه‌ریزی به روش TTT صورت گرفته است. زمان دمای آستانه این سه محصول طی یک تحقیق ۷ ساله (۱۹۹۶ تا ۲۰۰۲) توسط اوت و همکاران تعیین شده است. در هر کدام از مطالعات آنها دو تا دمای پوشش سبز آستانه همراه دو دمای سایه انداز آستانه (در کل ۴ تیمار آبیاری) مطابق جدول ۱، در نظر گرفته

شده است. بر روی داده‌های بدست آمده کارهای آماری صورت گرفته که به نتایج آنها اشاره می‌گردد. برای تمام تیمارها کمترین مقدار ضریب همبستگی ($r^2 = 0.96$) بدست آمد. متوسط مقادیر سایر r^2 ها ($r^2 = 0.99$) بدست آمد. این ضرایب معادله مقیاس شده خطی (۱۲) را تایید می‌کند. بنابراین معادله ۱۲ یک معادله با ارزش برای پیش بینی تغییرات دمای پوشش سبز روزانه با استفاده از یک دمای مرجع در طی ساعات روشنایی روز می‌باشد.

جدول ۱: تیمارهای استفاده شده برای هر سال و محصول

انباری قسمی	زمان استانه (min)	دمای استانه (°C)	محصول	سال
شوسط*	۲۴۰	۲۸	خرن	۱۹۹۹
حد اکثر	۱۶۰	۲۸		
متوسط*	۱۶۰	۳۰		
حد اکثر	۲۴۰	۳۰	منه	۲۰۰۶
شوسط*	۴۵۲	۲۸		
حد اکثر	۲۸۸	۳۰		
شوسط*	۲۸۸	۳۰	لوبیا	۲۰۰۳
حد اکثر	۲۵۲	۳۰		
شوسط*	۲۵۶	۲۷		
حد اکثر	۱۷۱	۲۷		
شوسط*	۱۷۱	۲۹		
حد اکثر	۲۵۶	۲۹		

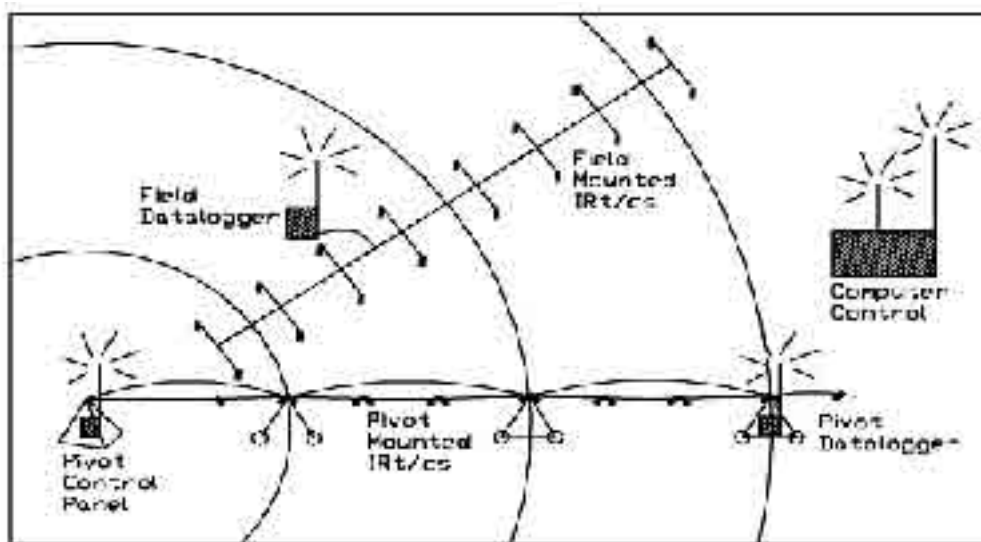
آبیاری نظری جهت رسیدن به نیاز گیاه که توسط اوت و همکاران ارائه شده است.

پیاده سازی خودکار نمودن سیستم

مطابق شکل (۳)، ۲۶ عدد دماسنج مادون قرمز (دارای دقت $\pm 2\%$) بر روی یک سیستم ستیریوت شامل ۳ برج و طول ۱۳۷ متر در سایت آزمایشگاهی بوشلند تگراس نصب گردید. دماسنج‌های مادون قرمز با زاویه ۴۵ درجه و روبه پایین و به سمت ردیف‌های محصول نصب شدند. نحوه و تجهیزات لازم جهت خودکار نمودن سیستم بطور شماتیک در شکل (۴) نمایش داده شده است.



شکل ۳: نحوه نصب دماسنج‌های مادون قرمز



شکل ۴: تجهیزات لازم جهت خودکار نمودن سیستم ستریپوت

سایت آزمایشگاهی یک ستریپوت تحقیقاتی سه برجی بطول ۱۲۷ متر است. چهار تیمار مختلف برای مقدار آب بصورت شعاعی حول ستریپوت بکار برده شده است (شامل ۱۰۰، ۶۶، ۳۳ درصد نیاز آبیاری و تیمار بدون آبیاری). در حدود نیمه پیوت، سه تکرار برای تیمار کنترل اتوماتیک (به روش TTT) و سه تکرار برای تیمار برنامه ریزی شده دستی (بر اساس کمبود رطوبتی خاک که توسط پروب نوترونی تعیین گردید) در نظر گرفته شد. جابجایی و استقرار پیوت توسط یک کامپیوتر که در همان نزدیکی قرار داشت و با دو رادیو با فرکانس ۹۰۰ مگا هرتز ارتباط برقرار می‌کرد، بصورت از راه دور کنترل می‌شد. در طول یک آبیاری اتوماتیک پیوت در لبه تیمار متوقف می‌شود و ۱۰ دقیقه جهت زهکشی توقف می‌کند، سپس سراسر تیمار آبیاری دستی را بصورت خشک طی می‌کند. ۲۰ میلیمتر آب در هر آبیاری اتوماتیک بکار می‌رود که این مقدار معادل ماکزیمم، یعنی معادل تبخیرتغرق دو روزه منطقه طی ماههای گرم تابستان می‌باشد. پس از آبیاری آخرین پلات اتوماتیک، پیوت به حرکت خود بصورت خشک ادامه می‌دهد تا به نقطه شروع برسد. همانطور که مشاهده می‌شود برنامه ریزی آبیاری بصورت دستی یا غیراتوماتیک بر پایه جایگزینی ۱۰۰٪ کمبود آب در خاک است در صورتیکه در روش TTT زمانبندی و مقدار آبیاری با توجه به تنش گیاه که در دمای سایه انداز گیاه نمود می‌یابد، صورت می‌گیرد و لذا نه تنها راندمان آبیاری افزایش می‌یابد بلکه کمبود آب در سیستم بصورت مکانیزه تر مورد سنجش قرار می‌گیرد. یعنی یک برنامه ریزی آبیاری اتوماتیک و سیستم کنترل آن که به شاخص‌های تنش گیاه واکنش نشان دهد، دارای این پتانسیل است که علاوه بر کاهش نیازهای کاربری و مدیریتی، عملکرد محصول را نسبت به آب آبیاری افزایش دهد.

نتایج

از مزایای تعیین دمای پوشش سبز این است که:

- ۱- می‌تواند به عنوان مکانیزم کنترل آبیاری در مزرعه بکار رود. به عبارت دیگر جهت تعیین یکنواختی کاربرد آب پارامتر موثری به شمار می‌رود. زیرا تغییرات دمای پوشش سبز می‌تواند بر عدم یکنواختی کاربرد آب دلالت داشته باشد و یا ممکن است به دلیل وجود مشکل در سیستم انتقال و تحویل آب باشد.

- ۲- داده‌های اندازه گیری شده توسط دماسنج مادون قرمز می‌تواند به عنوان اساس برنامه ریزی و زمان بندی آبیاری و نیز تعیین عمق آب آبیاری استفاده گردد.
- ۳- کاهش نیازهای کارگری و مدیریتی، افزایش عملکرد محصول را نسبت به آب آبیاری (کارآیی مصرف آب) به دنبال دارد.

منابع

- ۱- جارالهی، ر. ، مهدویان، م. ۱۳۷۹. واکنش عملکرد محصول نسبت به آب. نشریه شماره ۳۳. سری نشریات آبیاری و زهکشی.
- 2-Alderfasi, A. A. and Nilsen, D. C. 2001. Use of crop water stress index for monitoring water status and scheduling irrigation in wheat. *Agric. Water Mgt.* 47:69-75.
- 3-Idso, S. B. 1982. Non-water stressed baselines; a key to measuring and interpreting plant water stress. *Agric. Meteorol.* , 27: 59-70.
- 4-Idso, S. B. & Clawson, K. L. 1986. Foliage temperature; effects of environmental factors with implications for plant water stress assessment and the CO₂/climate connection. *Water Resour. Res.* , 22:1702-1716.
- 5-Ritchie, J. T. 1972. Model for predicting evaporation from a row crop with incomplete cover. *Water Res. Res.* , 8(5): 1204-1213.
- 6-Tanner, C. B. & Fuchs, M. 1968. Evaporation from unsaturated surface; a generalized combination method. *J. Geophys. Res.* , 73: 1299-1304.
- 7-Evans, D.E.2000. Spatial Canopy Temperature Measurements Using Center Pivot Mounted IRTS. In Proc. 5th International Conf. on Precision Agriculture. July 16-19. Bloomington, MN.
- 8- Evett, S.R., T.A. Howell, A.D. Schneider, D.R. Upchurch, and D.F. Wanjura. 1996. Canopy temperature based automatic irrigation control. In Proc. International Conf. Evapotranspiration and Irrig. Scheduling. C.R. Camp, E.J. Sadler and R.E. Yodler (eds.). November 3-6, 1996, San Antonio, TX. (PP. 207-213)
- 9- Harms, T. Soil Moisture Based Web to Wireless Center Pivot Operation. 2004. CACDI, Alberta, Canada.
- 10- McBurney. 1969. Measurement of Leaf Water Stress In Potato Using A Novel Infrared Thermometry Method.
- 11- Peters, R.T, and Evett, S. R. 2004. Complete Center pivot Automation Using the Temperature-Time Threshold Method of Irrigation Scheduling. in 2004 ASAE/CSAE Annual International Meeting , August 1-4 ,2004. Ottawa, Ontario, Canada .