Journal of Research in Horticultural Science
پژوهش در علوم باغبانی
Vol. 4, No. 2 Autumn and Winter 2025 (110–126)
جلد ۴، شماره ۲، پاییز و زمستان ۱۴۰۴ (ص ۱۲۶-۱۱۰)
10.22092/rhsj.2026.372989.1149
مقاله علمی مروری
تارنمای مجله: https://rhsj.areeo.ac.ir

افزایش تاب‌آوری اکوسیستم‌های باغی با بهره‌گیری از ویژگی‌های خرداقلیم‌ها

طاهره پروانه [۱*]، مهدی محمدی مقدم[۱]، سمیه ناصری [۲]، مصطفی قاسمی [۳]

۱- استادیار، بخش تحقیقات علوم زراعی و باغی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان سمنان (شاهرود)، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، شاهرود، ایران.

۲- استادیار، بخش تحقیقات جنگلها و مرتع، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان سمنان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، سمنان، ایران.

۳- استادیار، بخش تحقیقات علوم زراعی و باغی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان قزوین، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، قزوین، ایران.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۳/۱۲ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۳/۰۸

چکیده

تولید غذای کافی برای تأمین نیاز جمعیت رو به رشد جهان، همواره دغدغه‌ی دیرپای بشر محسوب می‌شده است. آسیب‌پذیری باغداری در برابر مخاطرات اقلیمی و پیامد آن بر امنیت غذایی و معیشت باغداران، امری انکارناپذیر است. افزایش بسامد رویدادهای شدید جوی از جمله خشکسالی، موج‌های سرمایی و گرمایی، طوفان، سیل، تگرگ و وزش بادهای تند، باغداری را در معرض خطرات ناشی از دگرگونی‌های اقلیمی قرار داده است. در شرایط کنونیِ تغییرات محسوس آب‌وهوا و گرمایش جهانی، بهره‌جستن از ویژگی‌های خرداقلیم‌ها برای مدیریت انواع تنش‌های اقلیمیِ اثرگذار بر تولید محصولات باغی و بهبود بهره‌وری باغ‌ها تا رسیدن به امنیت غذایی پایدار، ضروری به‌نظر می‌رسد. استفاده از ریزاقلیم‌ها به تعدیل شرایط نامساعد برای درختان و گیاهان باغی یاری می‌رساند و امکان توسعه عملکرد و رشد مطلوب محصول را فراهم می‌آورد. بدین منظور و در جهت افزایش آگاهی عمومی، مقاله پیشِ‌رو به بررسی نقش مدیریت انواع خرداقلیم بر مؤلفه‌های کلیدی در باغداری پرداخته است.

واژگان کلیدی: امنیت غذایی، تنش‌های محیطی، خرداقلیم، باغداری هوشمند اقلیمی.

Enhancing the Resilience of Orchard Ecosystems by Exploiting Microclimate Characteristics

Tahereh Parvaneh[1*], Mehdi Mohammadi-Moghadam[1], Somayeh Naseri[2], Mostafa Ghasemi[3]

1- Assistant Professor, Department of Agronomy and Horticultural Sciences, Semnan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center (Shahroud), Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Shahroud, Iran.

2- Assistant Professor, Forests and Rangelands Research Department, Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Semnan, Iran.

3- Assistant Professor, Crop and Horticultural Sciences Research Department, Agricultural and Natural Resources Research and Education Center of Qazvin Province, AREEO, Qazvin, Iran.

Received: June 2026 Accepted: March 2026

Abstract

Producing enough food to meet the needs of the growing world population has always been a longstanding concern for mankind. The vulnerability of orchards to climate hazards and its consequent impact on food security and orchardists' livelihood is undeniable. The increasing frequency of extreme weather events, including drought, cold waves, heatwaves, storms, floods, hail and strong winds, has exposed orchards to risks arising from climate change. Under the current conditions of noticeable climate changes and global warming, exploiting the characteristics of microclimates to manage various climate-related stresses affecting horticultural crop production and improving orchard productivity until achieving sustainable food security seems essential. The use of microclimates helps mitigate unfavorable conditions for fruit trees and horticultural plants and enables the development of optimal yield and growth. To this end and to raise public awareness, the present article examines the role of microclimate management on key components in horticulture.

Keywords: Food security, environmental stresses, microclimate, climate-smart horticulture.

*نویسنده مسئول: par1330@gmail.com

۱- مقدمه

مدیریت و تعدیل اثرات تغییر اقلیم در سطح جهان، راهبردی اساسی برای دستیابی به تولید پایدار محصولات کشاورزی و تأمین نیاز روزافزون جوامع بشری محسوب می‌شود. امروزه این مهم تحت تأثیر نوسانات مختلف و پدیده‌های تشدیدشده اقلیمی از جمله خشکسالی، یخبندان، امواج گرما و سیلاب‌های مکرر با چالش جدی روبه‌روست. بخش کشاورزی و به طور خاص، باغداری به دلیل ماهیت چندساله بودن درختان و سرمایه‌گذاری بلندمدت در آن، در برابر این تنش‌ها آسیب‌پذیرتر از کشاورزی زراعی یکساله است. به طوری که یک رویداد تنش‌زای اقلیمی مانند سرمای دیررس بهاره یا خشکسالی ممتد، می‌تواند طی چند روز، حاصل سال‌ها زحمت باغدار را بر باد دهد.

در حال حاضر، سیاست‌ها و اقدامات متنوعی برای تضمین پایداری باغداری و حداکثرسازی سودآوری آن اتخاذ شده است. سازمان خواربار و کشاورزی ملل متحد (فائو)، مفهوم کشاورزی هوشمند اقلیمی را به عنوان رویکردی کارآمد معرفی می‌کند که به هدایت اقدامات برای تبدیل سیستم‌های کشاورزی-غذایی به سوی شیوه‌های سبز و مقاوم در برابر اثرات نامساعد آب و هوا یاری می‌رساند. این رویکرد در راستای دستیابی به سه هدف اصلی، یعنی افزایش پایدار بهره‌وری و درآمد باغداران، سازگاری و ایجاد انعطاف‌پذیری در برابر تغییرات اقلیمی و کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای شکل گرفته است (FAO, 2013).

در این میان، یکی از کارآمدترین و کم‌هزینه‌ترین راهکارهای عملیاتی‌سازی کشاورزی هوشمند اقلیمی در باغداری، بهره‌گیری از ویژگی‌های خرداقلیم‌ها است. دستکاری و مدیریت خرداقلیم به اصلاح شرایط نامطلوب در مجاورت درختان کمک کرده و بستر را برای توسعه بهتر عملکرد و رشد مطلوب محصول فراهم می‌سازد.

مطالعات متعددی در سراسر جهان به بررسی و کاربرد این راهکارها پرداخته‌اند. به عنوان مثال، تحقیقات در باغ‌های مرکبات حوزه مدیترانه نشان می‌دهد که ترکیب تنش‌های غیرزنده مانند گرما، خشکی و شوری، واکنش‌های منحصر به فردی در درختان ایجاد می‌کند که با تک‌تک این تنش‌ها قابل پیش‌بینی نیست. پژوهشگران در این مناطق با استفاده از پایه‌های مقاوم، سامانه‌های آبیاری دقیق (مانند آبیاری قطره‌ای و تنظیم کمبود آبی) و کاربرد مالچ‌های ارگانیک، توانسته‌اند خرداقلیم اطراف درخت را بهبود بخشیده و تاب‌آوری آن را افزایش دهند (Balfagón and Gómez-Cadenas, 2025).

در حوزه مدیریت سرمازدگی، روش‌های متنوعی مبتنی بر دستکاری خرداقلیم ابداع شده است. استفاده از بادشکن‌های زنده و مصنوعی یکی از قدیمی‌ترین و مؤثرترین روش‌هاست. بادشکن‌ها با کاهش سرعت باد، اختلاط هوای گرم سطوح پایین را با هوای سرد بالایی محدود کرده و دمای باغ را تا چند درجه افزایش می‌دهند (جان‌محمدی و ملایی‌نیا، ۱۳۹۶). علاوه بر آن، برخی سامانه‌های آبیاری بارانی در شب‌های یخبندان با ایجاد یک لایه نازک یخ و آزادسازی گرمای نهان انجماد، دمای بافت جوانه را بالای نقطه کشنده نگه می‌دارند (باقری، ۱۴۰۰).

پژوهش‌های انجام‌شده در باغ‌های هلو نشان داده است که استفاده از آبیاری میکرواسپرینکلر، دمای جوانه‌ها را در شرایط آرام (بدون وزش باد) به طور متوسط بالاتر از منفی دو درجه سانتی‌گراد نگه داشته و دمای باغ را نسبت به درختان بدون آبیاری، بین دو تا پنج درجه سانتی‌گراد افزایش می‌دهد. این روش موجب شده است میزان میوه‌دهی (میوه به ازای هر متر طول شاخه) در درختان آبیاری‌شده نسبت به درختان بدون آبیاری که تقریباً میوه‌ای نداشتند، به طور چشمگیری افزایش یابد (Perry *et al*., 1990). استفاده از پوشش‌های تونلی و کیسه‌های کاغذی روی میوه‌ها، خرداقلیم مرطوب‌تری در اطراف میوه ایجاد کرده و به طور مؤثری از آسیب آفتاب‌سوختگی و ترکیدگی میوه جلوگیری می‌نماید (طاهری و حیدری، ۱۳۹۹).

در اقلیم‌های گرم و خشک، سایه‌اندازی نقش حیاتی دارد. مطالعات انجام‌شده در سیستم‌های کشاورزی جنگلی (آگروفارستری) نشان می‌دهد که قرار گرفتن درختان میوه در کنار درختان سایه‌انداز، می‌تواند شدت نور فتوسنتزی فعال را تا ۵۰ درصد کاهش داده و دمای هوا را در طول روز تا ۳/۲ درجه سانتی‌گراد کاهش دهد که اثر قابل توجهی در کاهش تنش گرمایی و تعرق دارد (Panozzo *et al*., 2022).

علاوه بر سایه، کاربرد مالچ‌های آلی و پلاستیکی نیز با حفظ رطوبت خاک، تعدیل دمای ریشه و کاهش تبخیر، تنش خشکی را در باغات کاهش می‌دهد (Sharma *et al*., 2025).

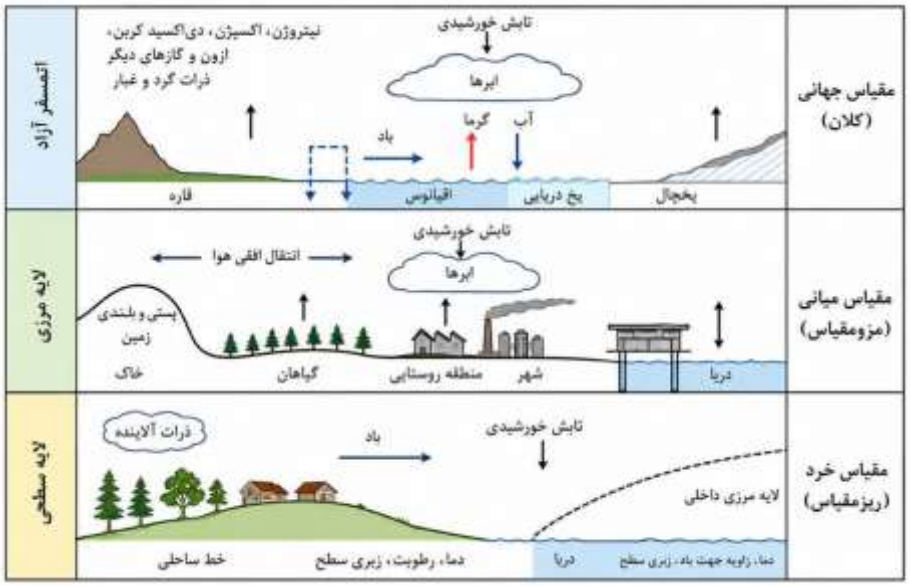
در سناریوی کنونی گرمایش جهانی و افزایش رویدادهای شدید آب و هوایی، اجرای چنین تغییرات مدیریتی در خرداقلیم باغات، نه یک گزینه، بلکه یک ضرورت انکارناپذیر است. این راهکارها با کاهش خطرات ناشی از تنش‌های اقلیمی و بهبود بهره‌وری مصرف آب و انرژی، گامی اساسی در جهت افزایش امنیت غذایی و پایداری باغداری در مواجهه با آینده‌ای نامطمئن محسوب می‌شوند. با این وجود، همچنان شکاف دانشی قابل توجهی در خصوص واکنش ترکیب گونه‌های مختلف میوه و پایه‌های گوناگون به این نوع مدیریت‌های خرداقلیمی در شرایط اقلیمی متنوع ایران وجود دارد. این مقاله چارچوبی مفهومی از ارتباط میان مدیریت خرداقلیم و تاب‌آوری اکوسیستم‌های باغی ارائه می‌دهد تا راهگشای توسعه راهبردهای کارآمد در مواجهه با تغییرات اقلیمی باشد.

.

۱-۱- خرد اقلیم[1]

گستره هر اقلیم بر اساس چشم انداز آن می‌تواند یک متر تا چند صد کیلومتر و با توجه به توزیع اشکال ویژه‌ی زیستی موجود در آن در نظر گرفته شود. ماکرواقلیم۲ (اقلیم کلان) یک لایه همگن از توده هوا بر روی زمین است که در آن هیچ تغییر جزئی یا کمی به صورت افقی رخ نمی‌دهد، سپس مزوکلیما (میان اقلیم۳) مطرح می‌شود که برد آن تا ۱۰۰ کیلومتر است و در نهایت اصطلاح خرد اقلیم یا میکروکلیما، اغلب برای مقیاس‌های فضایی تا ۱۰۰ متر به کار می‌رود (شکل ۱) و عبارت از آب و هوایی در نزدیکی زمین است که با ویژگی‌های زمینی تغییر می‌کند (Foken and Napo, 2008). خرد اقلیم نتیجه تعامل بین توپوگرافی محلی، ویژگی‌های منطقه و آب و هوای آن است. یک شیب رو به جنوب، دارای آب و هوای متفاوتی نسبت به شیب رو به شمال است. درجه حرارت در طول سال یا شرایط بارندگی در زیر درخت یا فقط چند متر دورتر در فضای باز متفاوت است. همچنین دمای سطح خاک با دمای چند سانتی‌متری زیر سطح اختلاف دارد. اینها خرداقلیم‌هایی هستند که تا حدودی در همه‌جا وجود دارند و در مقیاس چند ده متر، چند سانتی‌متر یا حتی چند میلی‌متر متفاوت هستند. چنین تفاوت‌هایی برای گیاهان و جاندارانی که در آنها زندگی می‌کنند، بسیار مهم است. از نظر مفهومی و منطقه‌ای خرد اقلیم‌ها معمولاً با سطوح یا ساختارهایی که ویژگی خود را از آنها می‌گیرند، مشخص می‌شوند. بنابراین می‌توان به خرد اقلیم‌های جنگلی، خاکی، دیوارها و ... اشاره کرد. علاوه بر این، اقلیم‌های خرد بلوک‌های سازنده آب و هوا هستند و آب و هوا در مقیاس وسیع تا حدی محصول مجموعه این خرد اقلیم‌های بی‌شمار است (Geiger *et al*., 2009).

[1] Microclimate
[2] Macroclimate
[3] Mesoclimate



شکل ۱- مقیاس‌های مختلف آب و هوایی و پدیده‌های مرتبط با آنها.

وقتی کشاورزان در مزارع خود یا در اطراف آنها درخت می‌کارند و یا جوامع برای نگهداری آب، سد یا سیل‌گیر حفر می‌کنند، آب و هوای اطراف خود را تغییر می‌دهند و به نوعی یک اقلیم خرد را به وجود می‌آورند. بسیاری از جنبه‌های اقلیم خرد که بر اکولوژی گیاهان تأثیر می‌گذارد، در کشاورزی نیز کاربرد دارد. مدیریت خرد اقلیم به منظور ایجاد کشاورزی پایدارتر است (Gliessman, 2015). معرفی شیوه‌های مدیریت زمین و آب می‌تواند تأثیر چشمگیری بر چشم انداز داشته باشد، جایی که تغییرات کوچک گرد هم می‌آیند، تا سبب ایجاد تحول بزرگتر محلی و منطقه‌ای شوند. اجزای مختلف اقلیمی به طور جدایی ناپذیری با یکدیگر مرتبط هستند. تغییر یک جزء بر کشاورزی محلی و چشم‌انداز تأثیر خواهد گذاشت. خرد اقلیم ممکن است در برابر تغییرات آب و هوایی اعم از دما، خشکسالی یا بارندگی‌های نامنظم و دیرهنگام موثر باشد یا اثرات آن را تقویت کند. بنابراین مهم است که بدانیم چگونه می‌توان پویایی بین اجزای خرد اقلیم و مقیاس‌ها را مدیریت کرد (Chen *et al*., 1999). خرد اقلیم و فعل و انفعالات آن موضوعی گسترده است و مسائل مربوط به اکوسیستم، تنوع زیستی، خاک، غذا، آب و انرژی باید به صورت مجموعه‌ای از عوامل و در ارتباط با هم مورد بررسی قرار گیرد (Van Steenbergen *et al*., 2011).

۱-۲- ایجاد تاب آوری از طریق مدیریت خرداقلیم

تاب آوری از کلمه لاتین resiliō یا resiliere گرفته شده که به معنای پرش به عقب است و به معنای توانایی شیء در بازگشت به شکل یا موقعیت اصلی خود پس از استرس اشاره دارد (غفارپور، میرصادقی و موذن، ۱۴۰۱). چالش ایجاد سیستم‌های تولیدی این است که بتوانند در حالی که راهی برای جداسازی کربن از هوا پیدا می‌کنند در برابر افزایش دما و تشدید رخدادهای آب و هوایی مقاومت کنند (FAO, 2013). مدیریت خرد اقلیم به عنوان راهکاری در کنار سازگاری و کاهش اثرات مخرب رخدادهای اقلیمی، باعث ایجاد انعطاف‌پذیری اکوسیستم می‌شود و تأثیر مثبتی بر سیستم‌های کشاورزی و تنوع زیستی می‌گذارد. با تمرکز روی مناظر و سیستم‌های اکولوژیکی درون آن‌ها، کارهای زیادی می‌توان انجام داد، تا حدی که سهم بزرگی از اثرات تغییر آب و هوای جهانی تابع انعطاف‌پذیری میکرواقلیمی است (Suggitt *et al*., 2018). تاب‌آوری به عنوان یک مفهوم جامع در تجزیه و تحلیل تعامل انسان با محیط و نحوه تأثیرپذیری انسان‌ها از فرایندهای موثر بر آن اهمیت زیادی یافته است (Janssen and Ostrom, 2006). اولین بار تاب‌آوری را در رابطه با ثبات اکوسیستم‌ها "ظرفیت یک سیستم برای تحمل مزاحمت، بدون فروپاشی" تعریف شده است (Holling,

1973). یک سیستم انعطاف‌پذیر می‌تواند در برابر ضربه‌ها مقاومت کند و در مواقع ضروری خود را بازسازی کند (Walker and Salt, 2006). به نظر می‌رسد مدیریت فاکتورهای اقلیمی از همه عوامل محیطی موثر بر کشاورزی دشوارتر باشد. جریان‌های عظیم انرژی و انتقال پدیده‌های آب و هوایی در مقیاس بزرگ یا کلان هنوز توسط پیشرفته‌ترین جوامع نیز قابل کنترل نیستند.

۱-۳- متغیرهای موثر بر خرد اقلیم

منطقه زراعی شامل تعدادی از اقلیم‌های خرد از جمله اقلیم محصولی است و تلاش کشاورزان سنتی در جهت اصلاح یا ایجاد و حفظ ویژگی‌های مطلوب یک یا چند خرد اقلیم زراعی صورت می‌گیرد. خرد اقلیم‌ها سیستم‌های پیچیده و تأثیرپذیر از متغیرهای زیادی هستند (Rosenberg *et al*., 1983). آنها در ابعاد افقی و عمودی نسبت زیادی از اشکال زندگی را پشتیبانی می‌کنند. این متغیرها شامل تشعشع، دمای هوا، دمای سطح، رطوبت، باد، غلظت CO_2 و ... است (Behera *et al*., 2012). هر موجود زنده به تنظیم خاصی از این متغیرها نیاز دارد که با مؤلفه‌های مؤثر بر ریخت شناسی، محیط ویژه‌ای را برای رشد گیاه تشکیل دهند.

۱-۴- مدیریت تابش

شاید اساسی‌ترین راه برای اصلاح خرد اقلیم مدیریت نور خورشید باشد، یعنی افزایش یا کاهش میزان انرژی تابشی که وارد سیستم خاک-گیاه شده یا از آن خارج می‌شود. تعادل تابشی ورودی و خروجی، انرژی ورودی به سیستم را نشان می‌دهد که نقش مهمی‌در تعیین دمای هوای محلی ایفا می‌کند و بسته به شرایط محلی می‌تواند بسیار متفاوت باشد (Brown and Gillespie, 1995). اگرچه در یک منطقه برای افزایش تابش کل خورشید نمی‌توان کار زیادی انجام داد ولی تکنیک‌هایی برای تشدید، کاهش یا توزیع مجدد تابش در محیط محصول وجود دارد. حتی در مناطق گرمسیری غنی از انرژی، یک مشکل مناطق جنگلی ناکافی بودن نور خورشید برای فتوسنتز یا گرمایش است. تاج پوشش متراکم، یک سطح فعال را در بالای منطقه گیاه تشکیل می‌دهد که به طور مؤثری بسیاری از تابش‌های خورشیدی را قطع می‌کند یا مقادیر اضافی انرژی را به سمت تبخیر رطوبت برگ درختان هدایت می‌کند. جنگل‌های متراکم تابش مستقیم به زمین را تا ۹۰ درصد کاهش می‌دهند. سایه تأثیر مستقیمی بر دمای خاک و از دست دادن رطوبت ناشی از تبخیر و تعرق دارد. با کاهش تابش ورودی، رطوبت خاک با شدت کمتری از دست می‌رود. اگرچه کاهش دمای هوا می‌تواند برای محصولات حساس به گرما، مفید باشد (Lasco *et al*., 2014). محافظت در برابر خورشید احتمالاً به این معنی است که سطوح آفتابی روی برگ گیاهان و سطح خاک کاهش یابد، در نتیجه بارهای حرارتی و تلفات تبخیر کاهش می‌یابد. سایه‌دهی با برگ، شاخه‌های بریده یا مالچ در مناطق گرمسیری تقریباً امری جهانی است. پیامدهای منفی احتمالی ناشی از سایه‌دهی این است که کاهش تابش خورشید به جای تشویق رشد گیاه، مانع رشد آن شود (Ong *et al*., 2015). با این حال برخی محققان این نکته را مطرح می‌کنند که در محیط‌های خشک و نیمه خشک، بهبود شرایط آب و هوایی و افزایش حاصلخیزی خاک ناشی از ایجاد سایه، بر اثرات منفی آن ترجیح دارد. سایه ناخواسته گیاهان زراعی را می‌توان با فاصله کاشت یا جهت ردیف کاهش داد (Lott *et al*., 2009). اگرچه جهت ردیف محصول معمولاً توسط عوامل دیگری مانند جاده‌ها، محدوده مزرعه و ویژگی‌های طبیعی تعیین می‌شود. گیاهان در ردیف‌های شمال به جنوب تابش خورشید بیشتری نسبت به گیاهان ردیف شرق به غرب دریافت می‌کنند. سطوح تابش بسیار بالا و بارهای گرمایی ناشی از آن بهره‌وری را در بسیاری از محصولات کاهش می‌دهد و ممکن است برای گیاهان جوان کشنده باشد (Lott *et al*., 2009). بنابراین تکنیک‌های مختلفی توسط کشاورزان برای محافظت از گیاهان، نهالستان‌ها و مزارع استفاده می‌شود. همچنین ممکن است تلاش‌هایی برای توزیع مجدد نور خورشید در محدوده محصول انجام شود. برای مثال، دیوارها و سنگفرش‌های سنگی، نور را به قسمت‌های زیر سایه درختان انگور منعکس می‌کنند. با این حال، ارزش واقعی دیوارها و روسازی‌ها در توانایی آنها در جذب و تابش گرما مشخص نیست، به ویژه اینکه این امر دمای شب را افزایش می‌دهد (Parisi and Tyc, 2021).

۱-۵- سپیدایی[5]

سپیدایی یا آلبِدو به معنی درصد بازتاب نور از سطح یک جسم است. مقادیر این کمیت می‌تواند از صفر (تاریک مطلق) تا یک (روشن مطلق) تغییر پیدا کند. آلبدو را با درصد یا به صورت یک عدد اعشاری کوچک‌تر از یک نشان می‌دهند. دمای یک سیاره عملاً تحت تأثیر میزان انعکاس انرژی خورشیدی، موسوم به سپیدایی سیاره و اثرات گازهای گلخانه‌ای است. سپیدایی سیاره‌ی زمین ۰/۳۷ است، بدین معنی که ۳۷٪ انرژی خورشیدی را منعکس می‌کند و ۶۳٪ آن را جذب می‌نماید (De Pater and Lissauer, 2015). از آنجا که تابش منعکس نشده در اجسام جذب می‌شود، تغییر آلبدو مقدار انرژی موجود برای گرمایش یا تبخیر را تغییر می‌دهد. عموماً سطوح صاف و رنگ روشن دارای آلبدوهای بیشتری نسبت به سطوح تیره و ناهموار هستند. آلبدو خاک عمدتاً توسط میزان رطوبت تعیین می‌شود. تعامل بین بارش باران و دمای هوا مهم است، زیرا بارش باعث تغییر در آلبدوی محلی و تأمین رطوبت برای تبخیر می‌شود. به‌طور کلی، خاک خشک دارای آلبدوی بالاتری نسبت به خاک مرطوب است. زمین‌های زراعی دارای آلبدوی بالاتری نسبت به جنگل‌ها هستند، به این معنی که زمین‌های زراعی نور خورشید بیشتری را به اتمسفر باز می‌گردانند و در نتیجه گرمای سطحی کمتری ایجاد می‌شود (Jackson *et al*., 2008).

پوشش گیاهی و مواد آلی دارای آلبدو بسیار پایینی است و بنابراین نور زیادی را جذب می‌کند. با این حال، تبخیر و تعرق بیشتر نیز در جنگل‌ها صورت می‌گیرد، که گرما را به صورت بخار آب به هوا باز می‌گردانند. این نشان می‌دهد که چندین عامل متناقض منجر به اثرات گرمایش و سرمایش در انواع مختلف کاربری اراضی می‌شود، که بیانگر پیچیدگی تعیین اثرات در هر شرایط اقلیمی است (Bonan, 2016).

بیشتر تغییرات در آلبدو سطحی که توسط کشاورزان سنتی انجام می‌شود، غیرعمدی است. به عنوان مثال، شیوه‌های خاکورزی زبری سطح را افزایش و بازتاب را کاهش می‌دهند (Cierniewski *et al*., 2018). برخی کشاورزان سطوح مزرعه را با زغال چوب حاصل از مواد سوخته تیره می‌کنند (Verheijen *et al*., 2013) یا بومیان تبتی برای تسریع در ذوب برف در بهار سنگ‌هایی را روی مزارع پوشیده از برف پرتاب می‌کنند. سنگ‌های جذب کننده اشعه به سرعت سوراخ‌هایی در برف ایجاد می‌کنند و در نتیجه سطحی سوراخ سوراخ ایجاد می‌کنند که بازتاب کمتری نسبت به برف صاف دارد. این روش در تلاش‌های اخیر روسیه برای پاکسازی برف از مناطق زراعی سیبری با پخش دوده و گرد و غبار نیز مشاهده شده است (Zender and Flanner, 2006; Diop, 2024).

۱-۶- کنترل نقل و انتقال طول موج بلند

انتقال تابش موج بلند در هر جهت در واقع شار خالص است (یعنی دریافت منهای انتشار). اگرچه سطح به طور کلی با تابش موج بلند گرما را از دست می‌دهد، اما با کاهش دمای سطح و در نتیجه کاهش سرعت خروجی یا افزایش برگشت موج بلند به سطح می‌توان از دست دادن گرما را کاهش داده یا حتی معکوس کرد (Moene and Van Dom, 2014). تشعشع برگشتی از اتمسفر به سطح معمولاً خارج از کنترل باغداران است، اما انرژی اضافی ممکن است از اجسام مجاور که انرژی خورشیدی را جذب کرده و در طول موج‌های بلند آن را ساطع می‌کنند، دوباره وارد محیط محصول شود. تاج درختان شبیه به دیوارهای گرم‌کننده عمل می‌کند بدین صورت که تابش خورشید را در طول روز جذب کرده و در شب به منبع انرژی موج بلند تبدیل می‌شود (Wujeska-Klause and Pfautsch, 2020).

شدت تابش خورشیدی دریافت شده در سطح تا حد زیادی تابعی از زاویه برخورد است. اگرچه عرض جغرافیایی، فصل و طول روز برای یک مکان تغییرناپذیر است، اما زاویه سطح نسبت به طیف‌های خورشید قابل تغییر است. تشعشعاتی که توسط یک سطح زاویه‌دار یا عمودی ره‌گیری می‌شوند ممکن است در ناحیه محصول منعکس شده و یا به عنوان انرژی موج بلند مجدداً تابش شوند. اثربخشی سطوح زاویه‌دار بستگی به ترکیب، رنگ و تغییر رابطه زاویه آن با

5. Albedo

خورشید در طول یک روز یا یک سال دارد. گیاهانی که در طرف آفتابی چنین سطوحی قرار دارند، هم از سطح کاشت افقی و هم از سطح زاویه‌دار اشعه دریافت می‌کنند. علاوه بر این، دمای شب با انتشار گرمای ذخیره شده در ساعات روز تعدیل می‌شود. پشته‌ها و دیواره‌های برآمده سطح فعال را به سمت بالا گسترش می‌دهد و آن‌ها را برای بوته‌ها، تاک‌ها و محصولات درختی کوتاه مساعد می‌سازد (McCaskill *et al*. 2016).

۱-۷- دمای هوا و شرایط خرد اقلیم

در حالی‌که دمای کلی هوا نتیجه فرایندهای مختلف تشعشعی است، شرایط دمایی در چند متری سطح خاک به سرعت تغییر می‌کند. دما، رطوبت و باد تحت تأثیر فرایندها و ویژگی‌های سطحی که با آن برهم کنش دارند، قرار می‌گیرند. پوشش گیاهی تعادل تابش را از طریق سایه زدن تغییر می‌دهد، در حالی که مانعی برای باد است (Gliessman, 2015). معمولاً حداکثر دمای هوا در تاج بالایی و حدود یک تا دو ساعت بعد از ظهر محلی رخ می‌دهد (Foken and Napo, 2008). در زیر تاج، دمای روز پایین‌تر است. در شب، حداقل درجه حرارت در تاج فوقانی به دلیل خنک شدن سطح زمین و هوای نزدیک به زمین رخ می‌دهد، که سرد شدن تابشی نامیده می‌شود. این امر به ویژه با آسمان صاف، باد آرام و رطوبت کم اتفاق می‌افتد. حوالی عصر، جنگل گرمتر از محیط اطراف است. محدوده دمای هوا و نوسانات روزانه و فصلی نقش زیادی در تعیین گیاهان و جانوران محلی دارد. همه موجودات دارای دمای مطلوب برای رشد هستند و حداقل و حداکثر آستانه دمای آنها برای مراحل مختلف رشد متفاوت است. به عنوان مثال، رشد ذرت در دمای بالاتر از ۳۵ درجه سانتی‌گراد محدود می‌شود، در حالی که برنج حداکثر آستانه دما را بین ۳۶ تا ۴۰ درجه سانتی‌گراد دارد (Sánchez *et al*., 2014). هنگامی‌که دما فراتر از این مقدار باشد، رشد به تأخیر می‌افتد یا از آن جلوگیری می‌شود، که منجر به از دست دادن عملکرد و یا کل گیاه می‌شود (Kamkar *et al*., 2023)، از آنجا که رطوبت با تعرق مهار می‌شود و تنش گرمایی احتمالی بیشتری ایجاد می‌شود حتی در مواردی که آب کافی وجود داشته باشد، گرمای شدید باعث تعطیلی فرآیندهای گیاهی می‌شود (Bonan, 2016). دمای بالاتر هوا نیز بر گسترش و اثرات آفات و بیماری‌ها تأثیر می‌گذارد، زیرا گیاهان بیشتر مستعد بیماری می‌شوند (Shelake *et al*., 2024).

۱-۸- دمای خاک

دمای خاک با تابش ورودی، هدایت حرارتی و ظرفیت گرمایی خاک تعیین می‌شود. میزان جذب یا انعکاس تابش ورودی تحت تأثیر رنگ خاک است. خاک تیره‌تر درصد بیشتری از تابش خورشید را جذب می‌کند، در حالی که خاک‌های روشن‌تر تمایل به انعکاس تابش و سردتر بودن دارند (Dobos, 2003).

رسانایی گرمایی، سرعت انتقال حرارت در خاک است و رسانایی بیشتر به این معنی است که تابش می‌تواند با سرعت بیشتری به داخل و خارج از خاک جریان یابد. به عبارت دیگر، نشان‌دهنده سرعت گرم شدن و سرد شدن خاک است. خاک‌هایی که رسانایی حرارتی بالایی دارند انرژی خود را سریع‌تر از دست می‌دهند و بنابراین سریع‌تر سرد می‌شوند. ظرفیت گرمایی با توانایی خاک برای ذخیره گرما سروکار دارد. این را می‌توان در شب‌های سردتر مشاهده کرد، هنگامی که گرما به آرامی از خاک خارج می‌شود و هوای سطحی را گرم می‌کند. در ارتفاعات از رطوبت خاک برای کاهش وقوع یخبندان استفاده می‌شود. با این حال، هنگامی‌که درجه حرارت به طور مداوم پایین است، یخ زدگی رخ می‌دهد (Nicholson, 2011). عوامل تعیین کننده هدایت حرارتی و ظرفیت حرارتی خاک عبارت اند از بافت خاک یا ترکیب معدنی، تخلخل، رطوبت خاک و مواد آلی (جدول ۱). وجود رطوبت خاک رسانایی حرارتی را تا حد زیادی افزایش می‌دهد، زیرا آب بیست بار بیشتر از هوا رساناست. مواد آلی خاک در مقایسه با خاک‌های معدنی دارای هدایت حرارتی بسیار پایینی هستند و بنابراین به عنوان یک عایق عمل می‌کنند که گرما را در طول روز از خاک دور نگه داشته و از خروج گرما در طول شب جلوگیری می‌کنند. این امر مانع از تبخیر رطوبت در طول روز و مانع پایین آمدن درجه حرارت خاک در شب می‌شود. خاک‌های شنی عموماً رسانایی گرمایی بالاتری دارند، در حالی که خاک‌های رسی دارای هدایت حرارتی پایین‌تری هستند (Luo, 2011). درحالی‌که ظرفیت گرمایی بین خاک‌های

شنی، رسی و پیت بسیار شبیه است، وجود رطوبت خاک تفاوت‌های زیادی ایجاد می‌کند. بیابان‌ها به طور کلی دارای خاک شنی و رطوبت کم در خاک هستند. این بدان معناست که هدایت حرارتی بالا و ظرفیت حرارتی کم هستند. گرما به سرعت به داخل و خارج جریان می‌یابد و خاک با سرعت زیادی به حداکثر دما در روز و حداقل دما در شب می‌رسد (Zhao and Li, 2011).

جدول ۱- هدایت گرمایی و ظرفیت حرارتی (محتوای آب خاک به عنوان درصد اشباع در نظر گرفته شده است (Bonan, 2016).

جزء خاک	هدایت حرارتی (وات بر متر-کلوین)	ظرفیت گرمایی (مگاژول بر متر مکعب-کلوین)
کوارتز	۸/۸	۲/۱۳
کانی‌های رسی	۲/۹۲	۲/۳۸
مواد آلی	۰/۲۵	۲/۵
آب	۰/۵۷	۴/۱۸
هوا	۰/۰۲	۰/۰۰۱۲
خاک شنی (تخلخل ۰/۴)		
درصد رطوبت ۰٪	۰/۳	۱/۲۸
درصد رطوبت ۵۰٪	۱/۸	۲/۱۲
درصد رطوبت ۱۰۰٪	۲/۲	۲/۹۶
خاک رسی(تخلخل ۰/۴)		
درصد رطوبت ۰٪	۰/۲۵	۱/۴۲
درصد رطوبت ۵۰٪	۱/۱۸	۲/۲۵
درصد رطوبت ۱۰۰٪	۱/۵۸	۳/۱
خاک پیت (تخلخل ۰/۸)		
درصد رطوبت ۰٪	۰/۰۶	۰/۵
درصد رطوبت ۵۰٪	۰/۲۹	۲/۱۸
درصد رطوبت ۱۰۰٪	۰/۵	۳/۸۷

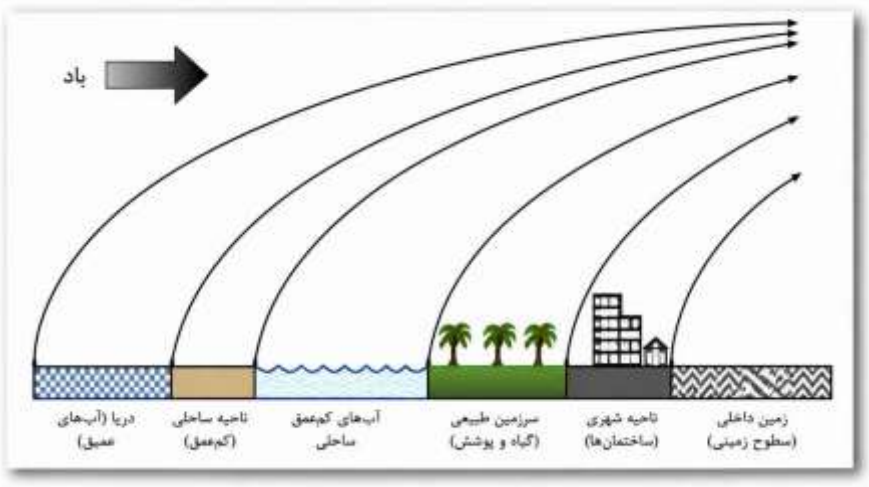
۱-۹- **دمای خاک** و شرایط اقلیمی

دمای خاک با تأمین گرمای لازم برای بذر، ریشه گیاهان و میکروارگانیسم‌های خاک بر رشد محصول تأثیر می‌گذارد. دمای بالای خاک می‌تواند بر رشد گیاه تأثیر منفی هم داشته باشد و فرایندهای زیستی میکروارگانیسم‌ها را متوقف کند (Gliessman, 2015). از سوی دیگر، دمای پایین خاک از جذب آب توسط گیاهان و نیتریفیکاسیون جلوگیری می‌کند و در نتیجه باروری خاک را کاهش می‌دهد و هنگامی‌که دمای هوا نسبت به دمای خاک بالاتر می‌رود، تبخیر افزایش می‌یابد (FAO, 2016). رطوبت خاک در تعدیل دما نقش کلیدی ایفا می‌کند. رطوبت بیشتر خاک منجر به تبخیر بیشتر و صرف انرژی بیشتری خواهد شد و بنابراین دمای محلی را در طول روز کاهش می‌دهد (Srivastava and Schultz, 2017; Cheruy *et al*., 2017). همچنین، رطوبت خاک دمای سطح را در شب افزایش می‌دهد، زیرا ظرفیت گرمایی و اینرسی حرارتی بالاتر خاک مرطوب، از خنک‌شدن شبانه جلوگیری می‌کند (Dirmeyer, 2018; Cheruy *et al*., 2017).

۱-۱۰- رطوبت خاک

رطوبت قابل دسترس خاک با توجه به بافت و عمق خاک، ظرفیت ذخیره آب خاک و میزان آب موجود، محتوای مواد

آلی و فعالیت زیستی موجود در آن تعیین می‌شود. بافت خاک با مقدار نسبی ذرات رس، سیلت و ماسه در خاک تعیین می‌شود (FAO, 2016). این ذرات هریک دارای خواص متفاوتی هستند که بر جذب آب و انتقال انرژی و گرما تأثیر می‌گذارند (شکل ۲).



شکل ۲- تولید لایه‌های مرزی داخلی در بالا روی سطح ناهمگن (Foken and Napo, 2008).

ذرات رس از کوچکترین ذرات هستند و بیشترین سطح و بیشترین پتانسیل جذب آب را دارا هستند و برعکس ماسه دارای بزرگترین ذرات و کمترین ظرفیت جذب آب است. بنابراین، خاک‌های شنی معمولاً دارای رطوبت کمتر و میزان تبخیر بیشتری نسبت به خاک‌های رسی هستند. با این حال، خاک‌های رسی می‌توانند در مناطق مستعد خشکی سفت شوند که باعث کاهش نفوذ و افزایش رواناب و در نتیجه کاهش دسترسی به آب می‌شود.

بافت خاک، مواد آلی خاک و فعالیت زیستی در سطح و در اعماق مختلف خاک، با هم ساختار خاک را تشکیل می‌دهند (حیدری و رحمانی، ۱۳۹۹). ساختار خاک هنگام تشکیل سنگدانه‌های ریز و درشت و ترتیب و مقدار نگه داشتن ذرات مختلف در کنار هم شکل می‌گیرد. یک ساختار خوب می‌تواند به مقاومت در برابر فرسایش بادی و آبی و همچنین افزایش نفوذ و ظرفیت ذخیره آب کمک کند (Gliessman, 2015؛ حیدری و رحمانی، ۱۳۹۹).

علاوه بر این، ظرفیت حفظ رطوبت خاک تحت تأثیر محتوای آلی آن است. افزایش میزان کربن آلی باعث افزایش ظرفیت نگهداری آب در خاک‌های شنی و کاهش آن در خاک‌های رسی می‌شود (Rawls *et al*., 2003). بنابراین افزایش مواد آلی به ویژه برای خاک‌های دانه درشت می‌تواند مفید باشد. نوع خاک و رطوبت خاک تأثیر مهمی بر فرسایش دارند. خاک‌های شنی به سختی با هم جمع می‌شوند و بنابراین مستعد فرسایش هستند. از طرف دیگر خاک‌های سیلتی و رسی سنگدانه‌های قوی‌تری تشکیل می‌دهند. رطوبت خاک نقش مهمی در اتصال ذرات خاک داشته و به کاهش فرسایش بادی کمک می‌کند.

حرکت آب در خاک با نفوذ آب و پدیده‌های تبخیر و تعرق مشخص می‌شود. نفوذ عبارت است از اینکه آب از طریق بارش یا آبیاری به خاک اضافه شود. وقتی آب لایه‌های بالای خاک را اشباع کند، نیروی گرانش، آب را به سمت پایین می‌کشد که به آن نفوذ می‌گویند. تبخیر از سطح خاک، آب را از طریق شیارهای باریک و مویرگی ایجاد شده در خاک به سمت بالا می‌آورد، زیرا کمبود آب ایجاد شده در سطح خاک آب را از اعماق بیشتری به سطح می‌کشاند. به طور مشابه، تعرق گیاه باعث ایجاد کمبود آب در اطراف ریشه می‌شود، زیرا آب از طریق تارهای ریشه جذب می‌شود. سرعت حرکت مویینگی می‌تواند آب را در خاک جابجا کند که به کمبود آب در لایه سطحی یا اطراف ریشه‌های گیاه و به نوع خاک بستگی دارد. خاک‌های شنی دارای منافذ بزرگتری هستند و آب را با قدرت

کمتری نگه می‌دارند. با این حال، از آنجا که حرکت مویینگی در برابر گرانش صورت می‌گیرد، خاک‌های با بافت ریز مانند خاک رس می‌توانند شرایط بهتری را برای تسهیل حرکت آب به سمت بالا و در نتیجه رسیدن به سطح فراهم کنند (Brouwer *et al*., 1985). این حرکت آب بخشی از چرخه روزانه و فصلی است. برای چرخه روزانه، کمبود آب در خاک که در طول روز ایجاد می‌شود، با حرکت آب در طول شب در صورت در دسترس بودن آب‌های زیرزمینی جبران می‌شود. حرکت رو به بالای آب در خاک می‌تواند تا چند ماه پس از آخرین بارندگی رخ دهد. در مناطق تحت تسلط یک یا دو فصل مرطوب، این امر دسترسی آب را پس از پایان فصل بارانی تضمین می‌کند، بنابراین دوره دوم کشت را امکان پذیر می‌سازد.

همچنین رطوبت خاک یکی از مهمترین عوامل تعیین‌کننده شرایط اقلیمی است. در صورت وجود رطوبت خاک، رسانایی گرمایی و ظرفیت حرارتی خاک بسیار افزایش می‌یابد (Bonan, 2016). تبخیر و تعرق فرآیند انتقال آب از سطح به اتمسفر است که در مقایسه با گرم کردن هوا مقدار زیادی انرژی مصرف می‌کند. بنابراین، مناطقی با رطوبت موجود در خاک دارای خرد اقلیم متعادل‌تری با دمای کمتر هوا و خاک هستند. این نه تنها تسهیل کننده رشد گیاهان است، بلکه بر الگوهای آب و هوایی و الگوهای بارندگی محلی نیز تأثیر می‌گذارد. برعکس، هنگامی‌که رطوبت خاک محدود است، انرژی بیشتری برای گرمایش معمول در دسترس است و دمای هوای سطح افزایش می‌یابد. تأثیر متعادل کننده رطوبت خاک در دماهای پایین نیز در نظر گرفته می‌شود، زیرا خاک‌های مرطوب در طول سرمازدگی بیشتر از خاک‌های خشک گرم می‌مانند. هنگامی‌که سطح خوبی از رطوبت خاک در دسترس باشد، زندگی میکروارگانیسم‌های خاک برقرار است. میکروارگانیسم‌ها مواد آلی را تجزیه کرده و مواد مغذی را آزاد می‌کنند، که به باروری خاک کمک می‌کند. شرایط مطلوب زمانی محقق می‌شود که رطوبت حدود ۶۰ درصد از فضای منافذ آب موجود را اشغال کند. آب اضافی از عرضه اکسیژن جلوگیری می‌کند، می‌تواند فعالیت میکروبی را کند، متوقف یا به حالت بی‌هوازی تبدیل کند و تأثیرات منفی بر رشد گیاه داشته باشد (Bot and Benites, 2005). بنابراین در مناطقی که سیل منظم وجود دارد، برای اطمینان از حاصلخیزی خوب خاک، زهکشی مناسب لازم است. علاوه بر این، آب اضافی می‌تواند باعث از بین رفتن مواد مغذی به دلیل غرقابی بودن خاک شود. از سوی دیگر، سطوح پایین رطوبت باعث کاهش فعالیت آنزیم‌ها می‌شود، که این امر فرآیندهای آزادسازی مواد مغذی را مختل می‌کند. از جمله می‌توان به چرخه نیتروژن که در حال حاضر یک ماده مغذی محدود کننده در بسیاری از خاک‌ها است، اشاره کرد (Sardans and Peñuelas, 2005).

۱-۱۱- رطوبت هوا و شرایط اقلیمی

رطوبت زیاد هوا تعرق گیاهان را کند می‌کند، زیرا هوای مرطوب بخار آب را به آسانی مانند هوای خشک جذب نمی‌کند. در اینجا، وجود باد محلی ضروری است زیرا هوای مرطوب را از مجاورت پوشش گیاهی منتقل می‌کند (Nicholson, 2011; Bonan, 2016). رطوبت زیاد هوا، همسو با تغییرات دمای هوا می‌تواند منجر به بارندگی شود.

رطوبت هوا، همراه با تغییرات دما در چرخه روزانه، می‌تواند منجر به تشکیل شبنم شود. شبنم زمانی رخ می‌دهد که درجه حرارت در سطح، کمتر یا برابر با دمای نقطه شبنم باشد. رطوبت هوا به شکل بخار آب سپس روی سطح سردتر متراکم شده و شبنم ایجاد می‌کند (Agam and Berliner, 2006). مه زمانی اتفاق می‌افتد که غلظت بخار آب اتمسفر، بدون در نظر گرفتن شرایط موجود در سطح، به نقطه اشباع برسد. بسیاری از آثار رسوب مه مانند رسوبات شبنم است. شبنم همچنین بر آلبدو خاک و پوشش گیاهی تأثیر می‌گذارد. در حالی که خاک را مرطوب و تیره می‌کند و آلبدو آن را پایین می‌آورد، سطحی بازتابنده روی برگ‌ها می‌سازد و باعث افزایش آلبدوی آنها می‌شود.

بادهای محلی نیز در تشکیل شبنم نقش دارند. در حالی که باد خفیف به تشکیل شبنم در مکان‌های بدون سرپناه کمک می‌کند، بادهای متوسط تا شدید مانع از تشکیل شبنم می‌شوند (Richards, 2004). وجود پوشش گیاهی که به عنوان بادشکن عمل می‌کند یا سایه ایجاد می‌کند در شکل‌گیری و مدت زمان شبنم نقش دارد. با کاهش سرعت باد، بادشکن‌ها می‌توانند به تشکیل شبنم کمک کنند، سایه ناشی

از پوشش گیاهی به کاهش دمای سطح محلی کمک می‌کند، که احتمال تشکیل شبنم را افزایش می‌دهد (Agam and Berliner, 2006).

۱-۱۲- باد و خرد اقلیم

در مقیاس بزرگ، اختلاف فشار باعث حرکت هوا می‌شود. در مقیاس‌های کوچکتر، توپوگرافی، اختلاف دما و موانع طبیعی می‌تواند جهت و سرعت‌های مختلف باد را القا کند. در مقیاس محلی، پدیده‌ها و پستی بلندی‌های موجود مانند وجود آب‌ها و کوه‌ها نقش مهمی ایفا می‌کنند. به عنوان مثال، در ماه‌های گرم‌تر، زمین سریع‌تر از سطح آب گرم می‌شود و باعث می‌شود که باد به سمت خشکی بوزد. در شب، جهت معکوس می‌شود زیرا باد به طرف سطح آب گرم‌تر می‌وزد. هوای گرم در طول روز شروع به بالا رفتن می‌کند (باد دره)، در حالی که در شب هوای خنک به سمت پایین (باد کوهی) حرکت می‌کند (Gliessman, 2015). در سطح مزرعه، وزش باد را می‌توان از طریق راهروها تحریک کرد یا از طریق وجود پوشش گیاهی یا ایجاد پرچین مسدود نمود. تأثیر درختان بادشکن بر سرعت باد می‌تواند در سطح زمین ۲۰ تا ۳۰ برابر ارتفاع آنها گسترش یابد.

بسته به دمای محیط، باد می‌تواند باعث گرم‌تر یا سردتر شدن هوا شود (Nicholson, 2011; Gliessman, 2015). باد با حذف لایه مرزی هوای گرم در اطراف گیاه، اثر خنک کنندگی دارد. این امر همچنین می‌تواند مصرف آب توسط گیاه را افزایش دهد، زیرا حذف لایه مرطوب اطراف اندام‌های گیاهی و جایگزینی آن با هوای خشک‌تر باعث افزایش تعرق می‌شود. علاوه بر این، حرکت هوا در تاج پوشش گیاهی سبب حفظ سطح مطلوب CO_2 برای رشد، حذف رطوبت اضافی و کاهش سطح رطوبت کلی گیاه و در نتیجه کاهش احتمال بروز بیماری‌ها می‌شود. بسیاری از محصولات توسط باد گرده‌افشانی می‌شوند. باد می‌تواند به عنوان ناقل مواد مغذی مانند ذرات خاک، انتشار و پراکنش بذور و حتی بیماری‌ها و آفات عمل کند. باکتری‌ها و قارچ‌ها برای انتقال به میزبان جدید، به باد وابسته هستند، در حالی‌که حشرات نیز از باد برای گسترش دامنه زندگی خود استفاده می‌کنند (Gliessman, 2015). همچنین اثرات مکانیکی مستقیم باد مانند آسیب احتمالی به برگ‌ها و محصولات زراعی وجود دارد. رسوبات معلق در باد به برگ‌ها و ساقه‌های گیاهان برخورد می‌کند و باعث آسیب ساختاری می‌شود. اثر دیگر باد، فرسایش بادی و از بین رفتن خاک سطحی است که حاصلخیزی خاک را کاهش می‌دهد.

۱-۱۳- بادشکن

بادشکن‌ها برای محافظت از گیاهان در برابر فشار باد پیشنهاد می‌شوند. آنها از تنوع بسیار زیادی از درختان و درختچه‌های زنده، از شاخه‌های بریده نی و سنگ و یا سایر مواد جامد ساخته شده‌اند و میزان کاهش سرعت باد براساس ارتفاع، جهت و نفوذپذیری آنها تعیین می‌شود. بادشکن‌های نیمه‌نفوذپذیر مانند درختان و درختچه‌ها باعث ایجاد گردبادهای شدیدتر در قبل و پشت بادشکن می‌شوند و احتمالاً موثرتر از سازه‌های دیواره‌ای بادشکن هستند (IAEA, 1998). درختانی که به عنوان بادشکن مورد استفاده قرار می‌گیرند، از محصولات در برابر الگوهای باد غالب محافظت می‌کنند و سرعت باد را قبل از رسیدن به محصولات کشاورزی تا حد زیادی کاهش می‌دهند (Cleugh, 1998).

دمای پشت بادشکن معمولاً کمی بیشتر است، زیرا اثر خنک‌کننده ناشی از باد دیگر اعمال نمی‌شود (Skidmore, 1969). رطوبت نیز در این محدوده بیشتر است. کاهش قرارگرفتن در معرض باد و افزایش رطوبت، میزان تبخیر و تعرق را از خاک و محصولات کاهش می‌دهد و می‌تواند بازده مصرف آب را افزایش دهد (Skidmore and Hagen, 1973). اثر مثبت دیگر کاهش اثرات فیزیکی باد، مانند آسیب به برگ محصول و از دست دادن سطح بالایی خاک در اثر فرسایش است (Cleugh, 1998). یک ملاحظه اصلی، افزایش مصرف آب درختان مورد استفاده در بادشکن است. در مناطقی که آب کمیاب است ممکن است شاهد کاهش عملکرد باشند، به ویژه هنگامی‌که نهال‌های جدید تازه کاشته شده است. درختان باد شکن برای آب با محصولات کشاورزی رقابت می‌کنند. با این حال، در مراحل بعدی، ریشه‌های درختان ممکن است دسترسی بیشتری به آب، در زمان خشکسالی ایجاد کنند زیرا آب را از اعماق خاک بیرون می‌کشند (Gliessman, 2015).

مطالعات متعدده نشان داده‌اند که استفاده از بادشکن‌های زنده می‌تواند عملکرد محصولات کشاورزی را به طور قابل

توجهی افزایش دهد. به گونه‌ای که دامنه این افزایش بسته به نوع محصول، منطقه و شرایط اقلیمی بین پنج تا ۵۰ درصد گزارش شده است (Hodges and Brandle, 1996). حداکثر مزایا معمولاً در فواصل سه تا شش برابر ارتفاع درخت از بادشکن مشاهده می‌شود و این اثرات مثبت می‌تواند تا ۱۰ برابر ارتفاع درخت نیز ادامه یابد. با این حال، در فواصل بسیار نزدیک به بادشکن (معمولاً کمتر از سه برابر ارتفاع)، کاهش عملکرد محصول قابل مشاهده است که عمدتاً ناشی از رقابت درخت و محصول بر سر منابعی نظیر آب، نور خورشید و مواد مغذی و همچنین سایه‌اندازی بیش از حد می‌باشد (Smith *et al.*, 2026).

۱-۱۴- مدیریت عملیات زراعی و خرداقلیم

اگرچه افزایش جذب بارندگی، بهبود رشد ریشه و کنترل علف‌های هرز از اهداف اصلی شخم زدن است، ولی خاک‌ورزی باعث کاهش جریان حرارت بین سطح و خاک زیرین شده و ارتباطات مویینگی را با خاک زیرین قطع می‌کند. بنابراین در حالی‌که لایه‌های سطحی شخم خورده به سرعت با تبخیر خشک می‌شوند، رطوبت زیر خاک حفظ می‌شود. شخم زدن و کشت ممکن است طوری برنامه‌ریزی شود که خاک در دوره‌های بارانی شخم و برهم زدگی را داشته باشد تا نفوذ و احتباس رطوبت را به حداکثر برساند (کریمی و رحیمی، ۱۴۰۱).

۱-۱۵- مالچ‌های سطح

مالچ مانعی بین خاک و تابش خورشید ایجاد می‌کند و وسیله‌ای برای کاهش تبخیر خاک از طریق کاهش دما و کاهش قرار گرفتن در معرض باد فراهم می‌سازد. مالچ‌های آلی یا معدنی طیف گسترده‌ای از امکانات را برای اصلاح ویژگی‌های سطح و خرد اقلیم محصول ارائه می‌دهند.

مالچ‌های مصنوعی (پلی‌اتیلنی) به دلیل توانایی در بهبود خرداقلیم خاک و افزایش عملکرد محصول، کاربرد گسترده‌ای در سیستم‌های کشاورزی مدرن یافته‌اند. این مالچ‌ها با ایجاد یک سد فیزیکی در سطح خاک، به طور مؤثری تبخیر رطوبت را کاهش داده و باعث صرفه‌جویی قابل توجه در مصرف آب می‌گردند (Kader *et al.*, 2017; Amare and Desta, 2021). علاوه بر این، مالچ‌های پلاستیکی سیاه با جذب انرژی خورشیدی، دمای خاک را در اوایل فصل افزایش داده و رشد اولیه گیاه را تسریع می‌بخشند (Kader *et al.*, 2017; Gan *et al.*, 2013). همچنین، این پوشش‌ها با مسدود کردن نور فتوسنتزی فعال، جوانه‌زنی و رشد علف‌های هرز را مهار می‌کنند (Huang, 2017). با این وجود، استفاده از مالچ‌های پلی‌اتیلنی سنتی با چالش‌های زیست‌محیطی جدی همراه است، زیرا این مواد در طبیعت تجزیه ناپذیر بوده و تجمع آن‌ها در خاک به تشکیل ذرات میکروپلاستیک و آلودگی محیط منجر می‌شود (Rodríguez-Seijo *et al.*, 2025; Wang *et al.*, 2024). اخیراً، توجه به مالچ‌های زیست‌تخریب‌پذیر به عنوان گزینه‌ای جایگزین و سازگار با محیط زیست معطوف شده است، هرچند چالش‌های مربوط به نرخ تجزیه و هزینه‌های بالاتر آن‌ها همچنان پابرجاست (Küçükel *et al.*, 2025).

به محصولات پوششی که بین گیاهان زراعی فعال کاشته می‌شود مالچ زنده می‌گویند. چنین مالچ زنده‌ای می‌تواند آلبدوی سطح خاک را تغییر داده و دمای هوا را بلافاصله بالاتر از محصول افزایش دهد (Gliessman, 2015). قسمت بالای مالچ که به سطح فعال تبدیل می‌شود، به دلیل ساختار مالچ، با خاک زیر ارتباط ضعیفی دارد. کاهش تبادلات گرما و رطوبت بین خاک و اتمسفر، خاک را سرد یا گرم نگه می‌دارد و تلفات تبخیری را کاهش می‌دهد. از آنجا که مالچ‌های آلی به طور گسترده‌ای در باغداری مدرن مورد استفاده قرار می‌گیرند، تأثیر آنها بر دمای خاک، نفوذ و تبخیر به طور گسترده مورد بررسی قرار گرفته است. مالچ سنگ یک روش کمتر رایج برای کنترل ریزاقلیم‌های سطحی شامل لایه‌های سنگ یا سنگریزه که روی مزارع پهن شده‌اند یا در اطراف گیاهان انباشته شده و فضای بین کشت را باز گذاشته‌اند. مالچ های سنگی تا حدی فصل مشترک سطوح را از هم جدا کرده و تلفات گرما و رطوبت را از خاک کاهش می‌دهد. فعالیت کرم و حشرات اغلب در زیر سنگ‌ها بیشتر از خاک عاری از پوشش است، که بیانگر بهبود محیط زیست برای جانوران خاک است. اثرات مالچ سنگ به ویژه در افزایش نفوذ آب و کاهش تبخیر قابل توجه است. کوری و کمپر گزارش دادند که بیش از چهارده اینچ رطوبت اضافی در زیر دو اینچ مالچ ماسه‌ای در مقایسه با خاک عاری از پوشش جمع شده است (Corey and Kemper, 1968).

۱-۱۶- استفاده از کشت‌های مخلوط

در این سیستم‌های کشت چندطبقه، گیاهان بلندتر با ایجاد سایه برای گیاهان کوتاه‌تر، نقش کلیدی در تعدیل خرداقلیم ایفا می‌کنند و همزمان خود نیز تولید اقتصادی دارند. این ساختار عمودی، یکی از اصول اساسی دارکشت ورزی (جنگل ورزی) است که در آن درختان سایه‌انداز با کاهش تنش‌های گرمایی و نوری، شرایط مطلوب‌تری برای رشد محصولات زیراشکوب فراهم می‌آورند (Isaac *et al*., 2024). گاهی نیز پوشش گیاهی زنده به طور عمدی برای ایجاد سایه کشت می‌شود. برای نمونه، در سواحل غربی مکزیک، از درختان و درختچه‌های کم‌ارتفاع برای حمایت و حفاظت از گیاه وانیل (*Vanilla planifolia*) در برابر تابش مستقیم خورشید و تنش خشکی استفاده می‌شود (Parada-Molina *et al*., 2022). با این حال، شناخته‌شده‌ترین و رایج‌ترین کاربرد سایه‌دهی هدفمند در کشاورزی مدرن، مربوط به محصولات نوشیدنی یعنی قهوه (*Coffea arabica*)، چای و کاکائو (*Theobroma cacao*) است. سایه‌دهی در این سیستم‌ها دمای شدید را تا پنج درجه سانتی‌گراد تعدیل کرده و با کاهش دامنه نوسانات دمایی، تنش حرارتی را بر روی گیاهان کاهش می‌دهد (Beer *et al*., 1998; Isaac *et al*., 2024).

۱-۱۶- کاربری اراضی

پویایی خرد اقلیم به طور مستقیم با اجزای چشم انداز، از جمله پوشش گیاهی، راهروها، جوی‌ها، جاده‌ها و خطوط برق و مناطق انتقال بین قطعه‌ها، مانند لبه‌های بین جنگل ها و ... ارتباط دارد (Chen *et al*., 1999). تغییرات میکرواقلیمی به ویژه در مناطق مرزی بین دو زیست بوم (اکوتون) در اکوسیستم‌های مجاور چشمگیر است. با توجه به افزایش تکه تکه شدن زمین‌ها و اراضی کشاورزی، چنین محیط‌های حاشیه‌ای که تغییرات آب و هوایی و اجزای زنده محیطی در آنها مشاهده می‌شود، بخش عمده‌ای از مناظر شده است. تغییرات در محیط‌های فیزیکی و اجزای زنده آن بر فرایندهای اکولوژیکی متفاوتی مانند بازسازی گیاه، پراکندگی دانه‌ها، چرخه تغذیه و تعاملات حیات وحش تأثیر می‌گذارد. تغییرات اقلیمی، مانند افزایش دما، ممکن است تأثیرات بیشتری در مقیاس محلی و منطقه‌ای نسبت به تغییرات پیش‌بینی شده از اثر گلخانه‌ای داشته باشد. شرایط اقلیمی بر توزیع جانورانی مانند پروانه‌ها، دوزیستان، خزندگان و پرندگان تأثیر می‌گذارد (Chen *et al*., 1999). بنابراین دستکاری در شرایط اقلیمی می‌تواند به عنوان ابزاری برای حفاظت از حیات وحش و اکوسیستم باشد.

۱-۱۷- دارکشت‌ورزی[1] (جنگل‌ورزی)

جنگل‌ورزی یکی از زمینه‌های اثبات شده در مدیریت خرد اقلیم است. ترکیبی از محصولات، درختان و مراتع را می‌توان در انواع مختلف و سیستم‌ها تقسیم‌بندی کرد. این برنامه با مدیریت مزرعه و دام از طریق افزودن یا نگهداری درختان و سایر گیاهان چندساله چوبی برای بهره‌مندی از تعاملات زیست محیطی و اقتصادی سروکار دارد (Nair, 1985). ارتقاء و حفاظت از زمین‌های جنگلی موجود مزایایی برای آب و هوای محلی مناطق اطراف نیز دارد. بسته به نوع و ویژگی‌های آن سیستم جنگلداری، پیامدهای متفاوتی برای خرداقلیم خواهد داشت. از مزایای جنگل‌ورزی می‌توان به افزایش رطوبت خاک، کاهش اتلاف آب ناشی از تبخیر خاک و تعرق محصول و افزایش حاصلخیزی خاک اشاره کرد. کاشت درختان خزان کننده و افزودن زیست‌توده ریشه و جذب مواد مغذی باعث افزایش سلامت کلی خاک می‌شود که محصولات کشاورزی می‌توانند از آن استفاده کنند (Lasco *et al*., 2014). جنگل‌ورزی همچنین می‌تواند حمایتی در برابر تغییرات اقلیمی شدید باشد. زیرا از طریق افزایش مناطق سایه‌دار و ایجاد سرپناه، تغییرات شدید آب و هوایی کاهش می‌یابد (Lin, 2007). وجود جنگل‌های کوچک در چشم انداز باز می‌تواند بادهای محلی ایجاد کند. خاکها از کاهش فرسایش بهره‌مند می‌شوند زیرا توسط درختان و سیستم‌های ریشه‌ای محافظت می‌شود و ظرفیت نگهداری آب آن با بهبود ساختار خاک ناشی از فعالیت بیولوژیکی افزایش می‌یابد (Balana *et al*., 2012). کاهش رواناب سطحی می‌تواند فرسایش موضعی

[1] Aagroforestry

خاک‌های فوقانی و مواد مغذی ارزشمند را به ویژه در مناطق خشک و نیمه خشک کاهش دهد. علاوه بر این، افزایش نفوذ آب می‌تواند باعث شود که رطوبت خاک برای استفاده محلی در زمان خشکسالی، از طریق افزایش موبینگی، قابل استفاده شود.

بررسی ویژگی‌های اقلیمی در مقیاس‌های مختلف با در نظر گرفتن اثرات تجمعی میسر خواهد بود و نمی‌توان به سادگی اهمیت خرد اقلیم را به طور مستقل در هر مقیاس ارزیابی کرد.

۲- نتیجه‌گیری کلی

مدیریت خرداقلیم به عنوان راهکاری در کنار سازگاری و کاهش اثرات مخرب رخدادهای اقلیمی، باعث ایجاد انعطاف‌پذیری اکوسیستم‌های کشاورزی شده و تأثیر مثبتی بر سیستم‌های تولیدی و تنوع زیستی می‌گذارد. تمرکز بر مناظر و سیستم‌های اکولوژیکی درون آن‌ها، امکان بهره‌مندی از پتانسیل بالای تعدیل خرداقلیم را فراهم می‌آورد، به‌گونه‌ای که بخش چشم‌گیری از اثرات تغییرات آب و هوایی جهانی با انعطاف‌پذیری میکرواقلیمی قابل مدیریت است. در حوزه دارکشت‌ورزی، مطالعات متعدد اثربخشی این رویکرد را در تعدیل خرداقلیم و کاهش تنش‌های گرمایی نشان داده‌اند. درختان سایه‌انداز با کاهش نوسانات دمایی، کاهش تابش مستقیم خورشید و افزایش رطوبت نسبی، شرایط مطلوب‌تری برای رشد گیاهان زیر پوشش درختی ایجاد کرده و تاب‌آوری اکولوژیکی مزارع را بهبود می‌بخشند. این تأثیر در سیستم‌های کشت چندساله مانند قهوه و کاکائو به‌وضوح مشاهده شده است.

در زمینه بادشکن‌ها، تحقیقات میدانی نشان می‌دهد که نوارهای حفاظتی با کاهش سرعت باد و تبخیر، به طور قابل توجهی رطوبت خاک را حفظ کرده و شرایط خرداقلیمی مطلوب‌تری برای محصولات کشاورزی ایجاد می‌کنند. این امر در مناطقی با تنش بادی، به افزایش عملکرد محصول منجر شده و فاصله بهینه از بادشکن نقش تعیین‌کننده‌ای در میزان این بهره‌وری دارد. در حوزه مدیریت خاک با استفاده از مالچ، پژوهش‌ها نشان داده است که کاربرد مالچ‌های آلی و پلاستیکی با افزایش رطوبت خاک، کاهش نوسانات دمایی و تعدیل دمای ریشه، کیفیت خاک را بهبود بخشیده و عملکرد محصولات باغی را افزایش می‌دهد. این اثرات در اقلیم‌های مختلف، از مناطق معتدل تا خشک و نیمه‌خشک، تأیید شده است. در زمینه خاک‌ورزی حفاظتی، نتایج تحقیقات گویای آن است که روش‌های کاهش‌یافته خاک‌ورزی مانند خاک‌ورزی نواری، در مقایسه با شخم مرسوم، با افزایش رطوبت خاک و کاهش دمای آن، نوسانات دمایی را به طور چشمگیری تعدیل می‌کنند. این روش‌ها به عنوان ابزاری کارآمد در تعدیل مخاطرات اقلیمی و بهبود تاب‌آوری سیستم‌های کشاورزی شناخته شده‌اند.

در مجموع، شواهد تجربی از سراسر جهان نشان می‌دهد که مدیریت خرداقلیم از طریق راهکارهای متنوعی مانند دارکشت‌ورزی، بادشکن‌ها، کاربرد مالچ و خاک‌ورزی حفاظتی، می‌تواند تاب‌آوری اکوسیستم‌های کشاورزی را در برابر تغییر اقلیم به طور معناداری افزایش دهد. این رویکردها با کاهش مخاطرات اقلیمی و بهبود بهره‌وری منابع، گامی اساسی در جهت امنیت غذایی پایدار و سازگاری با آینده‌ای نامطمئن محسوب می‌شوند.

تضاد و تعارض منافع - نویسندگان هر گونه تعارض و تضاد منافع اعم از تجاری و غیر تجاری و شخصی را که در ارتباط مستقیم یا غیر مستقیم با اثر منتشر شده است رد می نمایند.

منابع

باقری، ن. (۱۴۰۰). روش‌ها و سامانه‌های حفاظت از محصولات کشاورزی در برابر سرمازدگی. سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، معاونت آموزش و ترویج کشاورزی، نشر آموزش کشاورزی.

جان‌محمدی، ر.، و ملایی‌نیا، م. (۱۳۹۶). تأثیر بادشکن درختی گز در تغییر سرعت باد، دما و رطوبت. اولین کنفرانس بین‌المللی یافته‌های نوین در علوم کشاورزی، منابع طبیعی و محیط زیست. تهران، ایران.

حیدری، ع.، و رحمانی، م. (۱۳۹۹). تأثیر مواد آلی و فعالیت بیولوژیکی خاک بر پایداری ساختمان خاک و مقاومت به فرسایش در کاربری‌های مختلف اراضی. *مجله پژوهش‌های حفاظت آب و خاک*، ۲۷(۴)، ۶۲-۴۵.

طاهری، پ.، و حیدری، م. (۱۳۹۹). بررسی و مقایسه اثرات کیسه‌گذاری بر کاهش آفتاب سوختگی و برخی ویژگی‌های فیزیکی میوه انار رقم محلی شهرستان باغملک. نهمین کنفرانس ملی کشاورزی و توسعه پایدار. تهران، ایران.

غفارپور، ر.، میرصادقی، م.، و موذن، ف. (۱۴۰۱). بهبود تاب‌آوری شبکه قدرت در مواجهه با حملات متمرکز با استفاده از آنالیز پیشامد. *فصلنامه پدافند غیرعامل*، ۱۳(۳)، ۱۰-۱.

کریمی، م.، و رحیمی، ح. (۱۴۰۱). بررسی اثر روش‌های مختلف خاکورزی بر پایداری ساختمان خاک و حفظ رطوبت در شرایط دیم. نشریه علوم آب و خاک *(علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی)*، ۲۶(۳)، ۶۰-۴۵.

Agam, N., & Berliner, P. R. (2006). Dew formation and water vapor adsorption in semi-arid environments; a review. *Journal of Arid Environments*, *65*(4), 572-590.

Balana, B. B., Muys, B., Haregeweyn, N., Descheemaeker, K., Deckers, J., Poesen, J., Nyssen, J., & Mathijs, E. (2012). Cost-benefit analysis of soil and water conservation measure: the case of exclosures in northern Ethiopia. *Forest Policy and Economics*, *15*, 27-36.

Balfagón, D., & Gómez-Cadenas, A. (2025). Combined abiotic stresses in mediterranean citrus orchards: Impacts, adaptation strategies, and climate-resilient solutions. *Scientia Horticulturae*, *353*, 114462.

Beer, J., Muschler, R., Kass, D., & Somarriba, E. (1997). Shade management in coffee and cacao plantations. *Agroforestry systems*, *38*(1), 139-164.

Behera, S. K., Mishra, A. K., Sahu, N., Kumar, A., Singh, N., Kumar, A., Bajpai, O., Chaudhary, L. B., Khare, P. B., & Tuli, R. (2012). The study of microclimate in response to different plant community association in tropical moist deciduous forest from northern India. *Biodiversity and Conservation*, *21*, 1159-1176.

Bonan, G. (2016). Ecological climatology: Concepts and applications (3rd ed.). Cambridge University Press.

Bot, A., & Benites, J. (Eds.). (2005). Drought-resistant soils: optimization of soil moisture for sustainable plant production: Proceedings of the Electronic Conference Organized by the FAO Land and Water Development Division (Vol. 11). Food & Agriculture Organization of the United Nations.

Brouwer, C., Goffeau, A., & Heibloem, M. (1985). Irrigation water management: Training Manual, No.1 – Introduction to Irrigation. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO).

Brown, R. D., & Gillespie, T. J. (1995). *Microclimatic landscape design: creating thermal comfort and energy efficiency* (Vol. 1). New York: Wiley.

Chen, J., Saunders, S. C., Crow, T. R., Naiman, R. J., Brosofske, K. D., Mroz, G. D., Brookshire, B. L., & Franklin, J. F. (1999). Microclimate in Forest Ecosystem and Landscape Ecology; Variations in local climate can be used to monitor and compare the effects of different management regimes. *BioScience*, *49*(4), 288-297.

Cheruy, F., Dufresne, J. L., Hourdin, F., & Ducharne, A. (2017). Role of soil thermal inertia in surface temperature and soil moisture-temperature feedback. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, *9*(4), 1786-1801.

Cierniewski, J., Ceglarek, J., Karnieli, A., Ben-Dor, E., Królewicz, S., & Kaźmierowski, C. (2018). Shortwave radiation affected by agricultural practices. *Remote Sensing*, *10*(3), 419.

Cleugh, H. A. (1998). Effects of windbreaks on airflow, microclimates and crop yields. *Agroforestry Systems*, *41*(1), 55-84.

Corey, A. T., & Kemper, W. D. (1968). *Conservation of soil water by gravel mulches* (Vol. 30). Ft. Collins, CO: Colorado State University.Diop, S. (2024). *Dynamique de l'albédo de surface et bénéfice climatique de l'agriculture de conservation au Zimbabwe sub-humide* (Doctoral dissertation, Université Paris-Saclay). Dirmeyer, P. A. (2018). Wet soils elevate nighttime temperatures. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, *10*(1), 4-5.

Dobos, E. (2003). Albedo. In Encyclopedia of Soil Science (pp. 1-5). Marcel Dekker.

De Pater, I., & Lissauer, J. J. (2015). Planetary sciences. Cambridge University Press.

FAO. (2013). Climate-Smart Agriculture Sourcebook. Food and Agriculture Organization of the United Nations.
FAO. (2016). Physical factors affecting soil organisms.
Foken, T., & Napo, C. J. (2008). Micrometeorology, vol. 2 Springer.
Geiger, R., Aron, R. H., & Todhunter, P. (2009). *The climate near the ground*. Bloomsbury Publishing
Holling, C. S. (1973). Resilience and Stability of Ecological Systems. *Annual Review of Ecology and Systematics*, *4*, 1-23.
IAEA. (1998). Local effects of living windbreaks. INIS Repository.
Isaac, M. E., Gagliardi, S., Ordoñez, J. C., & Sauvadet, M. (2024). Shade tree trait diversity and functions in agroforestry systems: A review of which traits matter. *Journal of Applied Ecology*, *61*(6), 1159-1173.
Jackson, R. B., Randerson, J. T., Canadell, J. G., Anderson, R. G., Avissar, R., Baldocchi, D. D., Bonan, G. B., Caldeira, K., Diffenbaugh, N. S., Field, C. B., Hungate, B. A., Jobbágy, E. G., Kueppers, L. M., Nosetto, M. D., & Pataki, D. E. (2008). Protecting climate with forests. *Environmental Research Letters*, *3*(4), 044006.
Janssen, M. A., & Ostrom, E. (2006). Resilience, vulnerability, and adaptation: A cross-cutting theme of the International Human Dimensions Programme on Global Environmental Change. *Global Environmental Change*, *16*(3), 237-239.
Kamkar, B., Feyzbakhsh, M. T., Mokhtarpour, H., Barbir, J., Grahić, J., Tabor, S., & Azadi, H. (2023). Effect of heat stress during anthesis on the summer maize grain formation: Using integrated modelling and multi-criteria GIS-based method. *Ecological Modelling*, *481*, 110318.
Lasco, R. D., Delfino, R. J. P., & Espaldon, M. L. O. (2014). Agroforestry systems: helping smallholders adapt to climate risks while mitigating climate change. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, *5*, 825-833.
Lin, B. B. (2007). Agroforestry management as an adaptive strategy against potential microclimate extremes in coffee agriculture. *Agricultural and Forest Meteorology*, *144*, 85-94.
Lott, J. E., Ong, C. K., & Black, C. R. (2009). Understorey microclimate and crop performance in a Grevillea robusta based agroforestry system in semi-arid Kenya. *Agricultural and Forest Meteorology*, *149*(6-7), 1140-1151.
Luo, Q. (2011). Temperature thresholds and crop production: a review. *Climatic Change*, *109*, 583-598.
McCaskill, M. R., McClymont, L., Goodwin, I., Green, S., & Partington, D. L. (2016). How hail netting reduces apple fruit surface temperature: A microclimate and modelling study. *Agricultural and Forest Meteorology*, *226*, 148-160.
Moene, A. F., & Van Dam, J. C. (2014). *Transport in the atmosphere-vegetation-soil continuum*. Cambridge university press. Nair, P. K. R. (1985). Classification of agroforestry systems. *Agroforestry Systems*, *3*, 97-128.
Nicholson, S. E. (2011). Dryland climatology. New York., 516 pp: Cambridge University Press. https://doi.org/10.1017/CBO9780511973840.
Ong, C. K., Black, C., & Wilson, J. (Eds.). (2015). *Tree-crop interactions: agroforestry in a changing climate*. Cabi.Panozzo, A., Huang, H. Y., Bernazeau, B., Meunier, F., Turc, O., Duponnois, R., Prin, Y., Vamerali, T., & Desclaux, D. (2022). Impact of olive trees on the microclimatic and edaphic environment of the understorey durum wheat in an alley orchard of the Mediterranean area. *Agronomy*, *12*(2), 527.
Parada-Molina, P. C., Pérez-Silva, A., Cerdán-Cabrera, C. R., & Soto-Enrique, A. (2022). Climatic and microclimatic conditions of vanilla (Vanilla planifolia Jacks. ex Andrews) production systems in Mexico. *Agronomía Mesoamericana*, *33*(2), 48682.
Parisi, E. I., & Tyc, J. (2021). Multi-scale and multi-domain approaches for cultural terraced landscapes. In *Proceedings of the joint international event 9th ARQUEOLÓGICA 2.0 & 3rd GEORES, Valencia (Spain). 26–28 April 2021* (pp. 317-324). Editorial Universitat Politècnica De València.
Perry, K. B., Weiers, J. D., & Ferree, D. C. (1990). Microsprinkler irrigation for spring freeze protection of peach trees. *HortScience*, *25*(9), 1084-1087.
Rawls, W. J., Pachepsky, Y. A., Ritchie, J. C., Sobeckic, T. M., & Bloodworth, H. (2003). Effect of soil organic carbon on soil water retention. *Geoderma*, *116*, 61-76.
Richards, K. (2004). Observation and simulation of dew in rural and urban environments. *Progress in Physical Geography*, *28*, 76-94.
Rosenberg, N. J., Blad, B. L., & Verma, S. B. (1983). *Microclimate: the biological environment*. John Wiley & Sons.Sánchez, B., Rasmussen, A., & Porter, J. R. (2014). Temperatures and the growth and development of maize and rice: a review. *Global Change Biology*, *20*(2), 408-417.
Sardans, J., & Peñuelas, J. (2005). Drought decreases soil enzyme activity in a Mediterranean Quercus ilex L. forest. *Soil Biology and Biochemistry*, *37*(3), 455-461.
Sharma, J. C., Ananthakrishnan, S., Sharma, N., Kumar, S., Shankar, S. V., Ranjha, R., Lalkhumliana, F., Sharma, K., & Aravinthkumar, A. (2025). Mulching and irrigation strategies for climate resilient apple cultivation in high-density orchards. *Scientific Reports*, *15*, 17125.

Shelake, R. M., Wagh, S. G., Patil, A. M., Červený, J., Waghunde, R. R., & Kim, J. Y. (2024). Heat stress and plant–biotic interactions: Advances and perspectives. *Plants*, *13*(15), 2022.

Skidmore, E. L. (1969, March). Modifying the microclimate with wind barriers. In *Proceedings of seminar" Modifying the Soil and Water Environment for Approaching the Agricultural Potential of the Great Plains" Agricultural Council Publishers* (Vol. 34, No. 1, pp. 107-120). Skidmore, E. L., & Hagen, L. J. (1972). Microclimate modification by slat-fence windbreaks. *Agronomy Journal*, *64*(2), 160-162.

Skidmore, E. L., & Hagen, L. J. (1973). Potential evaporation as influenced by barrier-induced microclimate. In *Physical Aspects of Soil Water and Salts in Ecosystems* (pp. 237-244). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.Srivastava, P., & Schultz, D. (2017). The impact of an extreme case of irrigation on the southeastern United States climate. *Climate Dynamics*, *48*, 1309-1327.

Smith, M. M., Floress, K., Kellerman, T., Bentrup, G., MacFarland, K., Batcheler, M., & Ameyaw, L. (2026). Windbreaks in the United States: results from the National Agroforestry Producer Survey. *Agroforestry Systems*, *100*(5), 112.

Suggitt, A. J., Wilson, R. J., Isaac, N. J. B., Beale, C. M., Auffret, A. G., August, T., Bennie, J. J., Crick, H. Q. P., Duffield, S., Fox, R., Hopkins, J. J., Macgregor, N. A., Morecroft, M. D., Walker, K. J., & Maclean, I. M. D. (2018). Extinction risk from climate change is reduced by microclimatic buffering. *Nature Climate Change*, *8*(8), 713-717.

van Steenbergen, F., Tuinhof, A., Knoop, L., & Kauffman, J. H. (2011). *Transforming landscapes, transforming lives: the business of sustainable water buffer management*. 3R Water.

Verheijen, F. G., Jeffery, S., van der Velde, M., Penížek, V., Beland, M., Bastos, A. C., & Keizer, J. J. (2013). Reductions in soil surface albedo as a function of biochar application rate: implications for global radiative forcing. *Environmental Research Letters*, *8*(4), 044008.

Walker, B., & Salt, D. (2012). *Resilience thinking: sustaining ecosystems and people in a changing world*. Island press.

Wujeska-Klause, A., & Pfautsch, S. (2020). The best urban trees for daytime cooling leave nights slightly warmer. *Forests*, *11*(9), 945.

Zender, C., Flanner, M., Randerson, J., Mahowald, N., Rasch, P., Yoshioka, M., & Painter, T. (2006). Climate Effects and Efficacy of Dust and Soot in Snow. In *AGU Fall Meeting Abstracts* (Vol. 2006, pp. A32C-07).

Zhao, L., & Li, J. (2011). Studies of land-atmosphere interaction parameters in Taklimakan Desert hinterland. *Plateau Meteorology*, *30*(5), 1294-1299.