نشریه مدیریت آب در کشاورزی
جلد ۱۱، شماره ۲، پاییز و زمستان ۱۴۰۳، ص. ۱۲۸-۱۱۹

Water Management in Agriculture
Vol. 11, No. 2, Autumn And Winter 2025, 119-128

مقاله علمی -مروری

# تأثیر تغییر اقلیم بر سازگاری و تنوع ژنتیکی در گونه‌های گیاهی

مجتبی گلدانی[۱] و سید فاضل فاضلی کاخکی[۲*]

## چکیده

تغییرات اقلیمی تأثیرات چشمگیری بر توزیع گونه‌ها داشته است، به‌طوری‌که ترکیب گونه‌ها و عملکرد جوامع بیولوژیکی در سراسر جهان را تغییر داده است. پیش‌بینی‌ها نشان می‌دهد که تا سال ۲۱۰۰ از هر شش گونه گیاهی یک گونه منقرض می‌شود. تحقیقات اخیر در مورد میزان انقراض گیاهان و پوشش گیاهی نشان می‌دهد که ضریب انقراض تقریباً ۲/۳ گونه در سال است که خیلی بیشتر از مقدار انقراض طبیعی است. تغییر اقلیم و فشار ناشی از آن در برخی نقاط حساس یک عامل اصلی تنوع ژنتیکی در بین گونه‌ها است. این چنین نقاط حساس تنها ۱/۴ درصد سطح زمین را در برمی‌گیرد و این سطح در بردارنده ۴۴ درصد تمامی گونه‌ها است. برخلاف تکامل که مستلزم تغییرات در بیان ژن است، تغییرات اقلیمی سبب افزایش تنوع می‌شود که می‌تواند تکامل را در قالب‌پذیری فنوتیپی تحت تأثیر قرار دهد. اگر تنوع در درجه قالب‌پذیری (بیشتر از تنوع در صفت خودش) بر اساس ژنتیکی رخ داده باشد، آلل‌ها می‌توانند قالب‌پذیری مطلوب را همراه با افزایش تنوع اقلیمی افزایش دهند و این به موجود زنده اجازه می‌دهد تا با شرایط متنوع محیط بهتر سازگاری داشته باشد. فنوتیپ گیاه نتیجه برهمکنش محیط، فیزیولوژی، ساختار ژنتیکی و توانایی منحصربه‌فرد آن در تغییر فنوتیپ در پاسخ به شرایط خارجی (انعطاف‌پذیری و تغییرات ویژه) است و ممکن است فرصت‌های بیشتری را برای سازگاری به تغییرات اقلیمی در آینده ارائه دهد. زمانی که تغییر اقلیم سبب ایجاد تکامل در بیان آلل‌ها شود، تغییرات آللی به‌طور مجزا نمی‌تواند عمل نماید و نیاز است در داخل شبکه ژنی و در متن اثرات محیطی و مجموعه نقشه ژنتیکی موجود که سبب ظهور فنوتیپ شده مورد بررسی قرار گیرد.

**واژه‌های کلیدی:** انعطاف‌پذیری، انقراض گونه، تغییر آب‌وهوا، ژنوتیپ، فنوتیپ

## مقدمه

تأثیر فعالیت انسان بر اقلیم منطقه در حال آشکار شدن است و مشاهدات اقلیمی نشان‌دهنده روند افزایشی دما است. به‌طوری‌که دما از سال ۱۹۰۰ تا ۲۰۲۰ به‌طور میانگین ۰/۸ سانتی‌گراد افزایش داشته است (Li et al., 2021). سناریوهای تغییر اقلیم برای سال ۲۱۰۰، پیش‌بینی افزایش ۲ تا ۳ درجه سانتی‌گراد برای اروپای مرکزی و ۴-۵ درجه سانتی‌گراد برای نواحی مدیترانه‌ای داده‌اند (Hausfather & Peters, 2020; Li et al., 2021). همچنین در همین زمان غلظت کربن دی‌اکسید برای برخی مناطق به ۴۸۶ قسمت در میلیون خواهد رسید (در برخی سناریوها تا ۱۰۰۰ قسمت در میلیون پیش‌بینی شده است) (Wagner et al., 1996). تغییرات اقلیم همراه با بروز تنش‌های زنده (شیوع برخی آفات و بیماری‌ها) و تنش‌های غیرزنده (خشکی، شوری، طوفان، آتش‌سوزی) خواهد بود. تحت تغییرات اقلیمی پویایی جمعیت بسیاری از ارگانیسم‌های زنده نیز تغییر خواهد کرد، به‌طوری‌که جمعیت حشرات گیاه‌خوار و بیماری‌های قارچی تحت تأثیر قرار خواهند گرفت. بااین‌حال در برخی از گونه‌های مشخص، هجوم عوامل وابسته به منطقه

[۱] کارشناس ارشد رشته محیط زیست، گروه مهندسی عمران دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران
[۲] دانشیار، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی خراسان رضوی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، مشهد، ایران (* نویسنده مسئول: sf_fazeli@yahoo.com)
تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۱/۰۴
تاریخ برداشت: ۱۴۰۳/۰۴/۰۶

جغرافیایی خاصی نبوده و طغیان آن‌ها تحت تأثیر تنش‌های آب و هوایی گسترش خواهد یافت (Huberty and Denno, 2004). از نظر ژنتیکی تغییرات اقلیمی نشان‌دهنده یک تغییر تدریجی جهت‌دار و پراکنده است که مکانیسم‌های تکاملی ناهمسان در سازگاری ژنتیکی گونه‌ها رخ داده و در سطوح مختلف نمود پیدا می‌کند: ۱) در سطح فردی سبب افزایش هتروزیگوستی و پاسخ‌های سازگاری می‌شود، ۲) در سطح اکوسیستم انتخاب طبیعی اتفاق می‌افتد، ۳) در سطح گونه‌های محلی و سازگار از طریق جریان ژنی سبب افزایش کلونی و جمعیت آن‌ها می‌شود و ۴) در سطح رقابتی جامعه سبب تسهیل در ایجاد هیبریداسیون‌های خاص بین گونه‌ها می‌گردد. هتروزیگوسیتی ویژه به‌منظور تنوع ژنتیکی در سطح گونه اتفاق می‌افتد (Muller-starck, 1998). پاسخ‌های تطابقی در سطح گونه در طول حیات آن می‌تواند در شرایط تغییر اقلیم مشاهده شود برای مثال، در شرایط افزایش میزان $CO_2$ در اتمسفر سبب کاهش تعداد روزنه‌های هوایی در سطح برگ‌ها می‌شود (Wagner et al., 1996). بسیاری از پاسخ‌های ژنتیکی به تغییرات موقتی و یا شدید محیطی و یا تنش‌های زنده در گیاهان مستندسازی شده است (Skroppa et al., 1994). زمان ظهور جوانه‌ها در بهار، توقف سرشاخه‌ها در تابستان، تشکیل جوانه‌ها در پاییز و نحوه ایجاد حلقه‌های سالانه لیگنینی همگی بر اساس دما در طی فصل باروری ممکن است تشدید و یا کاهش یابند (Bossdrof et al., 2008). انتخاب طبیعی به سمت سازگاری‌های محلی می‌رود که جمعیت را به سمت بروز قابلیت‌های بیشتر در مواجهه با تغییرات محیطی هدایت می‌کند. تداوم تکرارهای جهت‌دار ژنی یا ظهور صفات فنوتیپی در طی آزمایش‌ها روی نتایج به‌وضوح مستندسازی شده است. ورود ژن‌های جدید از طریق دانه گرده از گونه‌هایی که سازگاری و قابلیت زیادی به تغییرات محیطی دارد، می‌تواند در جمعیت پذیرنده این دانه‌های گرده سازگاری محیطی ایجاد نماید (Smouse and Sork, 2004). در جریان تغییرات محیطی که در آن با افزایش درجه حرارت همراه است جمعیت‌هایی که در عرض‌های جنوبی قرار دارند می‌توانند منبع با ارزشی از دانه گرده برای عرض‌های بالاتر باشند.

افزایش دما و کاهش بارندگی خطر خشک‌سالی را افزایش می‌دهد. عملکرد فتوسنتزی گیاهان که منجر به افزایش زیست‌توده و محصول می‌شود، کاهش می‌یابد. در این شرایط بوم‌نظام سازگار با خشک‌سالی تحت‌تأثیر قرار خواهند گرفت و پوشش گیاهی و جمعیت گیاهان زراعی رو به کاهش خواهد رفت؛ بنابراین توزیع و تراکم گونه‌ها تغییر خواهند کرد. برای مثال در طول ۵۰ سال گذشته افزایش ۱/۴۸ درجه سانتی‌گراد منجر به جایگزینی گسترشی راش اروپایی با بلوط در ارتفاعات بالا شده است (Penuelad and Boada, 2003). فتوسنتز در طول فصل گرم کاهش‌یافته و تنفس افزایش می‌یابد. انتظار می‌رود که رشد و عملکرد زیست‌توده کاهش یابد؛ و اکوسیستم‌های سازگار با خشک‌سالی تحت تأثیر خشک‌سالی قرار گرفته و کارکرد آن‌ها کاهش می‌یابد. هدف از این تحقیق بررسی تأثیر تغییر اقلیم بر سازگاری و تنوع ژنتیکی گونه‌های مختلف گیاهی است.

## مواد و روش‌ها

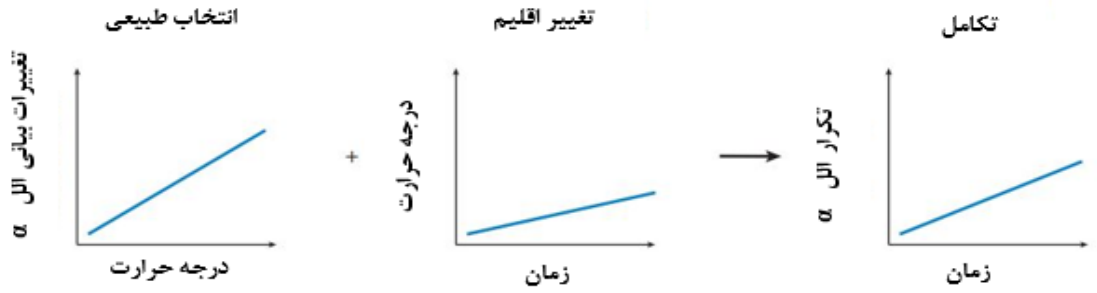
به‌منظور مطالعه تأثیر اقلیم بر ساختارهای فنوتیپی و ژنوتیپی جامعه گیاهی تحقیقی به‌صورت بازنگری در کلیه منابع کتابخانه‌ای انجام شد. برای این منظور بر اساس موتورهای جستجوی Google scholar، Science Direct، Gigalib و SID و با استفاده از کلمات کلیدی مانند: تغییر اقلیم، پوشش گیاهی، فنوتیپ، سازگاری، انعطاف‌پذیری، فنولوژی، جهش‌های ژنی منابع مورد بازنگری قرار گرفت. پس از دسترسی به منابع موارد موردنظر با تلفیق باهم انتخاب و مورد تجزیه‌وتحلیل قرار گرفته و نگارش شدند.

## نتایج و بحث

### مکانیسم‌های تکامل

ساده‌ترین راهکاری که تغییر اقلیم می‌تواند ساختار ژنی جمعیت‌ها را تحت تأثیر قرار دهد که در شکل ۱ ارائه شده است. فرض کنید که یک آللی ($\alpha$) در یک مکان لوکس وجود دارد و صفتی را مانند تحمل به دما را کنترل می‌کند. همچنین فرض کنید که انتقال این ژن به‌خصوص سبب افزایش تحمل و بهبود قابلیت (توانایی بقا و تکثیر) به درجه حرارت‌های بالا است. هر گونه افزایش دما در طول زمان به نفع بیان ژن $\alpha$ هست. به‌منظور درک

و پیش‌بینی افزایش در تکرار آلل در این مدل ساده، آلل‌های موردتوجه در تغییر اقلیم نیاز است تا تأثیرات آن‌ها در ایجاد قابلیت بقا در شرایط متفاوت تغییر اقلیم مورد شناسایی قرار گیرند. همچنین موجودات ممکن از طریق تغییرات فنوتیپی تا تغییرات تکاملی به تغییرات اقلیم واکنش نشان دهند (Etterson and Shaw, 2001). بااین‌حال، در این حالت تغییرات ژنتیکی در داخل جامعه وجود نخواهد داشت زیرا که قالب‌پذیری فنوتیپی در همان نوع ژنوتیپ در محیط‌های مختلف فنوتیپ‌های مختلفی را بیان می‌کند (Schlichting and Pigliucci, 1998).

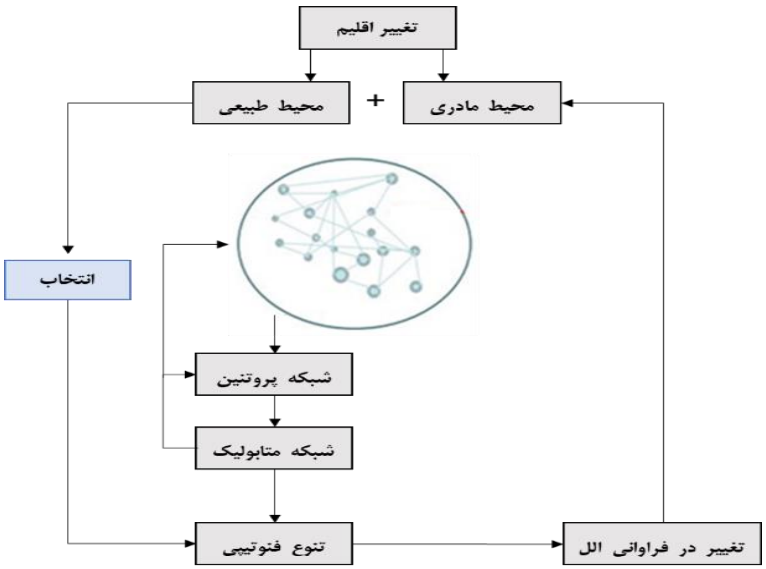



**شکل ۱- تاثیر تغییر اقلیم در طی زمان بر تکامل در بیان الل و قابلیت زنده‌مانی**

برخلاف تکامل که مستلزم تغییرات در بیان آلل‌ها است. تغییرات اقلیمی که ممکن است تنوع را در شرایط اقلیمی افزایش دهد، می‌تواند تکامل را در قالب‌پذیری فنوتیپی تحت‌تأثیر قرار دهد. اگر تنوع در درجه قالب‌پذیری (بیشتر از تنوع در صفت خودش) بر اساس ژنتیکی رخ دهد، آلل‌ها می‌توانند قالب‌پذیری مطلوب را همراه با افزایش تنوع اقلیمی افزایش دهند و این به موجود زنده اجازه می‌دهد تا با شرایط متنوع محیط بهتر سازگاری داشته باشد (Matesanz et al., 2010). زمانی که تغییر اقلیم سبب ایجاد تکامل در بیان آلل‌ها می‌شود. تغییرات آللی به‌طور مجزا نمی‌تواند عمل نماید و نیاز است در داخل شبکه ژنی و در متن اثرات محیطی و مجموعه نقشه ژنتیکی موجود که سبب ظهور فنوتیپ شده مورد بررسی قرار گیرد (شکل ۲).

## تغییر اقلیم و گونه‌ها

طرح‌های اجرا شده در خصوص تغییر در اقلیم جهانی نشان می‌دهد تا سال ۲۱۰۰ از هر شش گونه یک‌گونه انقراض می‌یابند (Urban, 2015). تحقیقات اخیر در مورد میزان انقراض گیاهان و پوشش گیاهی نشان می‌دهد که تا قبل از سال ۱۹۰۰ از ۱۲۹۵۲۹ گونه مورد بررسی ۲۵۶ گونه منقرض شده است و از سال ۱۹۰۰ تا سال ۲۰۱۸ تعداد گونه منقرض شده بالغ بر ۳۱۵ گونه بوده است و حتی ممکن است برای گونه‌های تازه توصیف شده و یا گونه‌هایی که اطلاعات قابل‌استفاده کمی وجود دارد خیلی بیشتر از مقادیر اعلام شده باشد (Humphreys et al., 2019). علاوه بر این، تغییرات اقلیم باعث تغییرات اساسی در توزیع گونه‌ها، فراوانی و ترکیب آن‌ها و در نهایت پوشش گیاهی در سراسر جهان می‌شود. این تغییرات در طی فرایندهای توسعه و بهره‌برداری بیش‌ازحد، جنگل‌زدایی، بیماری‌ها، آفات و سایر تهدیدات سبب افزایش انقراض گونه‌ها می‌شود (McMahon et al., 2011). این‌چنین تأثیراتی نیازمند درک بیشتری برای اینکه که چه طوری انعطاف‌پذیری فنوتیپی، تنوع ژنتیکی و سازگاری محلی به گونه‌ها اجازه بقا را می‌دهد، است (Duputie et al., 2015). به‌منظور پیش‌بینی اثرات بلندمدت و میزان پاسخ گونه‌ها به تغییر اقلیم، لازم است آنچه به‌طور تاریخی پاسخ گونه‌ها را به تغییرات هدایت کرده است را درک نماییم.




**شکل ۲- تأثیر شبکه ژنی و عوامل محیطی در تغییرات آللی (Bradshaw and Holzapfel, 2010)**

تغییر اقلیم و فشار ناشی از آن در برخی نقاط حساس یک عامل اصلی تنوع ژنتیکی در بین گونه‌ها است. این‌چنین نقاط حساس تنها ۱/۴ درصد سطح زمین را در برمی‌گیرد و این سطح در بر دارنده ۴۴ درصد تمامی گونه‌ها است (Myers et al., 2000). وجود این‌چنین مقادیر زیاد تنوع زیستی در مکان‌های خاص سبب افزایش حساسیت آن‌ها به تغییرات محیطی شده است. الگوهای تنوع و تحقیق انجام‌شده به‌منظور درک فرآیندهای فیزیولوژیکی، مولکولی و اکولوژیکی در الگوهای تنوع دیدگاهی را به‌منظور نتیجه‌گیری از تأثیرات متقابل گونه و اقلیم در آینده را ارائه می‌دهد. فنوتیپ گیاه نتیجه برهمکنش محیط، فیزیولوژی، ساختار ژنتیکی و توانایی منحصربه‌فرد آن در تغییر فنوتیپ در پاسخ به شرایط خارجی (انعطاف‌پذیری و تغییرات ویژه) است و ممکن است فرصت‌های بیشتری را برای سازگاری به تغییرات اقلیمی در آینده ارائه دهد. انعطاف‌پذیری یک فنوتیپ تغییر در ظهور فنوتیپ یک ژنوتیپ در محیط است (Sultan, 1987). انعطاف‌پذیری ممکن است نقطه شروعی باشد برای سازگاری در محیط، به‌طوری‌که انعطاف‌پذیری، شایستگی لازم را برای هتروزیگوستی در محیط‌ها را تعیین می‌کند (Franks et al., 2014). اختلافاتی که بین ژنوتیپ‌ها در پاسخ‌های آن‌ها به شرایط محیطی وجود دارد، ناشی از برهمکنش ژنوتیپ و محیط است. این‌ها اغلب ژن‌های متمایزی را بیان می‌کنند یا فرآیند فیزیولوژیکی متمایزی را شروع می‌کنند تا یک پاسخ کلیدی به تغییرات محیطی بدهند (Mateus et al., 2014). پاسخ‌ها و سازگاری‌های گونه‌ها را می‌توان در امتداد همدیگر مورد ارزیابی قرار داد، در یک انتها پاسخ‌های گیاه به تغییر محیط از طریق استفاده از تغییرات غیر ژنتیکی در فنوتیپ (برای مثال انعطاف‌پذیری فنوتیپی) است درصورتی‌که در انتهای دیگر پاسخ‌ها ممکن است ناشی از تغییرات تکاملی که در ساختار ژنتیکی جمعیت‌ها به وجود آمده، باشد. پاسخ‌ها نیز می‌تواند ناشی از ترکیب سازگارهای لازم در امتداد بقاء باشد.

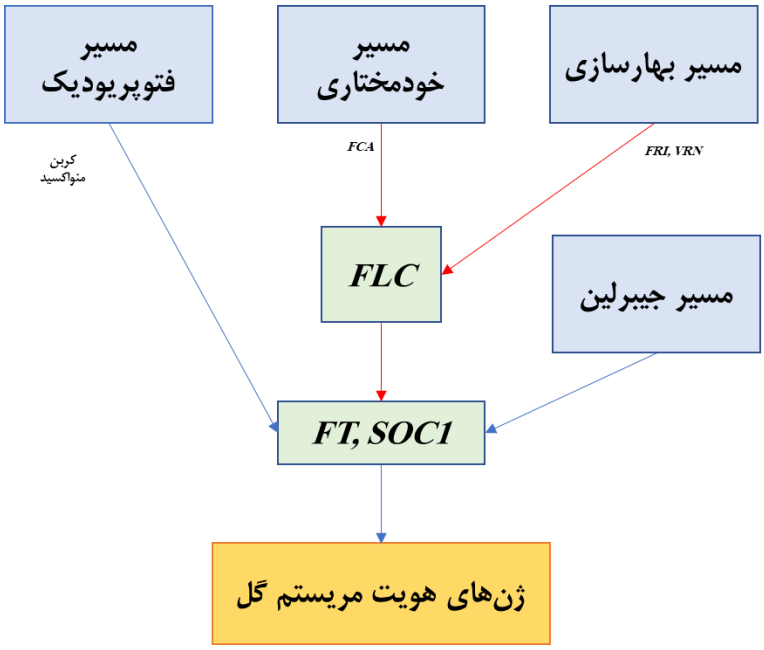
## تغییر اقلیم و فنولوژی گیاه

شواهد نشان می‌دهد که تغییرات تجمعی در مواجهه با تغییر اقلیم در ساختار ژنتیکی و فنوتیپی گیاه صورت می‌پذیرد. این تغییرات شامل تغییر در اندازه زیست‌توده، تغییر در پاسخ‌های دمایی، تغییر در زمان رکود و دوره تولیدمثلی (Franks et al., 2007) است. تغییر در رویدادهای زمانی که فنولوژی (مراحل رشد گیاه) نامیده می‌شود، یکی از مهم‌ترین شواهد متعاقب کننده گونه‌ها در پاسخ به تغییرات اقلیمی است (Maclean et al., 2018). افزایش دما اغلب منجر به زودتر آغاز شدن رویدادهای بهاری در

گونه‌ها است و این با توسعه پاسخ‌های فنولوژیکی در دامنه وسیعی از گونه‌ها هم به‌صورت محلی و هم در سطح منطقه جغرافیایی وسیعی از یک اقلیم همراه است. تغییرات اقلیم، نحوه عملکرد گیاهان و تعامل با محیط آن‌ها را تغییر می‌دهد. رویدادهایی مانند امواج گرما، خشک‌سالی، آتش‌سوزی، اختلال در بارش، در چرخه‌ها تشدید شده و الگوهای غیرقابل‌پیش‌بینی آب‌وهوایی در مناطق قابل‌مشاهده است (IPCC, 2013). این تغییرات نیاز درک درجه حرارت، کربن و آب را که آن‌ها به‌عنوان عناصر کلیدی در عملکرد و بهره‌وری پوشش گیاهی هستند را افزایش می‌دهد. درجه حرارت تنها یکی از عوامل غیرزنده است که رشد و نمو گیاه را تحت تأثیر قرار می‌دهد و بر پوشش گیاهی مؤثر است. بیشتر تحقیقاتی که در خصوص تأثیر دما در رشد و نمو گیاهان انجام‌شده مربوط به آمریکای شمالی (Parmesan and Yohe, 2003)، اروپا (Chmielewski and Rötzer, 2001) و بخش‌های از آسیا (Ge et al. 2015) است. نتایج تغییر اقلیم در کانادا نشان داده است که رویداد گلدهی در طی ۳۵–۱۰۰ سال گذشته ۱۵ تا ۵۱ روز زودتر شروع شده است و در کشورهای اروپایی گلدهی در طی سال‌های ۲۰۰۰–۱۹۷۱ در بیش از ۵۰۰ گونه گیاهی با میانگین ۲/۵ روز در هر دهه زودتر شروع شده است (Menzel et al., 2006). نتایج تغییر اقلیم در ظهور برگ در درختان سیب و انگور که طی ۳۵ سال گذشته در بریتانیا نشان داد با توجه به تغییرات دمایی برگ‌ها ۲ تا ۸ روز زودتر ظاهر شدند. همچنین در تحقیقی مشابه در ژاپن، افزایش دما طی ۵۰ سال اخیر، سبب زودتر گلدهی به تعداد ۵/۶ روز در هر دهه در چهار گونه درخت جینکو (Ginkgo biloba L.) شده است (Woldearegay, 2020). همگام با این تغییرات، در کانادا میانگین دماهای زمستان ۲/۳ درجه سانتی‌گراد و در ماه آپریل ۰/۸ درجه سانتی‌گراد افزایش داشته است. کشورهای اروپایی نیز همین روند را تجربه کرده‌اند. دما در یک دهه بین ۱/۶–۱/۷ افزایش داشته است (European Environment Agency, 2018). در ایران تحقیقات نشان داده است که در یک صد سال گذشته افزایش ۲ درجه سانتی‌گراد دمای شبانه‌روز و افزایش میانگین دمای حداقل در یک دهه برای تهران تا حدود ۰/۶۸ سانتی‌گراد گزارش شده است (کریمی و همکاران، ۱۳۹۷). دما نقش کلیدی در آغازش گلدهی، باز شدن جوانه‌ها، خروج برگ‌ها و شروع رویدادهای نموی در گیاه دارد. دما همبستگی زیادی با عملکرد گیاه و رویدادهای متناسب محیطی همگام با شرایط محیطی دارد. مطالعات قبلی در مناطق معتدله به نقش برجسته دما اشاره دارد که بیش از هر عامل دیگری سبب ایجاد تنوع در فنولوژی بین گونه‌ها شده است (Calinger et al., 2013). در مطالعه‌ای نشان داده شد تا افزایش دما و کاهش بارندگی سبب کاهش طول دوره‌های فنولوژیکی در چرخه زندگی گیاه ذرت شد و با افزایش دما تا ۲ درجه سانتی‌گراد عملکرد آن ۵/۶۵٪ و زمانی که دما ۴ در جه سانتی‌گراد افزایش یابد عملکرد تا ۳۷٪ کاهش خواهد یافت (Parks et al., 2018).

## تغییرات ژنتیکی در زمان گل‌دهی و تغییر اقلیم

زمان گل‌دهی یک صفت مهم در گیاهان است که ارتباط زیادی با سازگاری ژنتیکی گیاهان به تغییر اقلیم دارد. شرایط اقلیمی تأثیر شدیدی بر فنولوژی تولیدمثلی و ارتباط زمان گلدهی دارد (Primack, 1985). مطالعات قبلی نشان داده است که زمان گل‌دهی معیاری در پاسخ تکاملی به تغییر اقلیم است. مطالعه‌ای نشان داد که در گیاه یک‌ساله کلزا (*Brassica rapa*)، زمان گل‌دهی وراثتی است و گیاهان زود گل ده نسبت به گیاهان دیر گل ده از آمادگی بیشتری در شرایط خشکی برخوردارند. میانگین زمان گل‌دهی به دنبال خشک‌سالی طبیعی در گیاهان نسبت به گیاهان قبل از خشک‌سالی که اجداد و فرزندان با هم در شرایط مشترک رشد می‌کردند، زودتر بوده است. در بسیاری از گونه‌ها زمان گل‌دهی قابلیت توارثی دارد و تحت تأثیر انتخاب طبیعی و به دنبال تغییر در اقلیم تغییر می‌کند (Miller-Rushing and Primack, 2008). یکی از ویژگی‌هایی که زمان گل‌دهی را به‌عنوان صفتی ایدئال برای مطالعه مبانی ژنتیکی در شرایط تغییر اقلیم قرار داده است، وجود اطلاعات قبلی در خصوص ژن‌ها، مسیرها و فرایندهای درگیر در تعیین زمان گل‌دهی است (Michaels, 2009). در گیاه آرابیدوبسیس، زمان گل‌دهی توسط یک شبکه ژنی که دربردارنده چهار مسیر اصلی از قبیل دوره نوری، دما، جیبرلین و خودکار است، تنظیم می‌شود (Michaels, 2009).




**شکل ۳- تنظیم شبکه ژنتیکی زمان گل‌دهی در آرابیدوبسیس: نقش مسیرهای فتوپریود، خودکار، ورنالیزاسیون و جیبرلین**

پیام‌های داخلی (هورمون‌هایی مانند جیبرلین) و خارجی (دوره نوری و دما) این مسیرها را تحت‌تأثیر قرار می‌دهند. به‌گونه‌ای که از زود و یا دیر گل‌دهیِ گیاه جلوگیری به عمل می‌آورند. اگرچه این شبکه نظارتی کاملاً پیچیده است و دربردارنده صدها ژن، فاکتور رونویسی و پروتئین‌های گیرنده و مستلزم تنوع در بیان ژن و همین‌طور تنظیم ساختار ژن در پاسخ به شرایط محیطی است، تنها یک تعداد نسبتاً اندکی از ژن‌ها به‌منظور تغییر از حالت وحشی ظاهر می‌شوند و فنوتیپ زمان گل‌دهی را در جمعیت‌های طبیعی تحت‌تأثیر قرار می‌دهند (Lempe et al., 2005)؛ بنابراین، پیام‌های داخلی و خارجی اولین نامزد بر آزمون مبنای ژنتیکی اختلاف در زمان گل‌دهی و بروز تکامل در شرایط طبیعی است. مطالعات قبلی نشان داد که در گیاه آرابیدوبسیس همبستگی بین زمان گل‌دهی، ژن‌های نامزد کنترل‌کننده زمان گل‌دهی و اقلیم وجود دارد. در مطالعه‌ای در گیاه آرابیدوبسیس دریافتند که تنوع ژنتیکی بر مکان ژنی زمان گل‌دهی تحت‌تأثیر شرایط آب‌وهوایی قرار دارد و ژنوتیپ‌های دیر گل‌ده بیشتر محدود شده‌اند تا ژنوتیپ‌هایی که پتانسیل زود گل‌دهی داشتند (Sarup et al., 2011) و قویاً اظهار شد که زمان گل‌دهی ژنوتیپ‌ها به‌شدت تحت‌تأثیر اقلیم در گونه‌ها است. به‌طورکلی نتایج نشان می‌دهد تغییر اقلیم از طریق تأثیر بر میزان انعطاف‌پذیری سبب تکرار بروز برخی آلل‌های کنترل‌کننده فنوتیپ خاص سازگاری شده که درنهایت بقای گیاه را در محیط کنترل می‌کند.

## نتیجه‌گیری

تغییر اقلیم تأثیرات قابل‌توجهی بر ساختار ژنتیکی و تنوع گونه‌های گیاهی دارد و ساده‌ترین راه برای این تأثیر، تغییر در زمان گل‌دهی ژنوتیپ‌ها به دلیل انعطاف‌پذیری فنوتیپی است. تغییرات اقلیمی باعث تغییرات گسترده در توزیع، فراوانی و ترکیب گونه‌های گیاهی می‌شود و این تغییرات همراه با عواملی مانند توسعه بیش‌ازحد، جنگل‌زدایی، بیماری‌ها و آفات، خطر انقراض گونه‌ها را افزایش می‌دهد. فنوتیپ گیاه نتیجه تعامل بین محیط، فیزیولوژی، ساختار ژنتیکی و توانایی آن در تغییر فنوتیپ در پاسخ به شرایط محیطی است. این انعطاف‌پذیری فنوتیپی می‌تواند فرصت‌های بیشتری برای سازگاری به تغییرات اقلیمی آینده فراهم کند.

تغییرات تجمعی ناشی از تغییر اقلیم شامل تغییر در اندازه زیست‌توده، پاسخ‌های دمایی و زمان رکود و دوره تولیدمثلی است. این تغییرات منجر به تغییر در رویدادهای زمانی مراحل رشد گیاه می‌شود که یکی از مهم‌ترین نشانه‌های سازگاری گونه‌ها به تغییرات اقلیمی است. به‌طورکلی، تغییر اقلیم با تأثیر بر میزان انعطاف‌پذیری باعث تکرار بروز برخی آلل‌های کنترل‌کننده فنوتیپ خاص سازگاری می‌شود که در نهایت بقای گیاه در محیط را تضمین می‌کند.

## منابع


کریمی، م.، کاکی، س. و رفعتی، س. ۱۳۹۷. شرایط و مخاطرات اقلیمی آیندهٔ ایران در تحقیقات اقلیمی، نشریهٔ تحلیل فضایی مخاطرات محیطی، ۵(۳): ۱- ۲۱.

Bossdorf, O., Richards, C.L., Pigliucci, M., 2008. Epigenetics for ecologists. Ecology Letters, 11: 106–115.

Calinger, K. M., Queenborough, S., and Curtis, P.S. 2013. Herbarium specimens reveal the footprint of climate change on flowering trends across north-central North America. Ecology Letters, 16: 1037-1044.

Chmielewski, F.M., and Rötzer, T. 2001. Response of tree phenology to climate change across Europe. Agricultural and Forest Meteorology, 108: 101-112

Etterson, J.R., and Shaw, R.G. 2001. Constraint to adaptive evolution in response to global warming. Science, 294:151–54

European Environment Agency. 2018. Global and European temperature: Indicator Assessment. Report No 4/2018, pp. 25. https://www.eea.europa.eu/data-andmaps /indicators/ global-and-europeantemperature-9/assessment.

Franks, S. J., Weber, J. J., and Aitken, S. N. 2014. Evolutionary and plastic responses to climate change in terrestrial plant populations. Evolutionary Applications, 7: 123-139.

Franks, S.J., Sim, S., and Weis, A.E. 2007. Rapid evolution of flowering time by an annual plant in response to a climate fluctuation. Proc. Natl. Acad. Sci. USA, 104:1278–82.

Ge, Q., Wang, H., Rutishauser, T., and Dai, J. 2015. Phenological response to climate change in China: a meta-analysis. Global Change Biology, 21: 265-274.

Hausfather, Z., and Peters, G.P. 2020. Emissions – the 'business as usual' story is misleading. Nature, 577, 618–620.

Huberty, A.F., and Denno, R.F., 2004. Plant water stress and its consequences for herbivorous insects: a new synthesis. Ecology, 85: 1383–1398.

Humphreys, A. M., Govaerts, R., Ficinski, S. Z., Lughadha, E. N., and Vorontsova, M. S. 2019. Global dataset shows geography and life form predict modern plant extinction and rediscovery. Nature Ecology and Evolution, 3: 1043-1047.

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2013. Climate Change. 2013. The Physical Science Basis, Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, edited by T. F. Stocker et al., (Cambridge University Press, Cambridge, U. K.), 1535 pp.

Lempe, J., Balasubramanian, S., Sureshkumar, S., Singh, A., Schmid, M., and Weigel, D. 2005. Diversity of flowering responses in wild *Arabidopsis thaliana* strains. PLoS Genet. 1:109–18.

Li, Q., Sun, W., Yun, X., Huang, B., Dong, W., Wang, X. L., Zhai, P., & Jones, P. (2021). An updated evaluation of the global mean land surface air temperature and surface temperature trends based on CLSAT and CMST. *Climate Dynamics*, *56*, 635-650.

MacLean, H. J., Nielsen, M. E., Kingsolver, J. G., and Buckley, L. B. 2018. Using museum specimens to track morphological shifts through climate change. Philosophical Transactions of the Royal Society B, *374*: 20170404.

Matesanz, S., Gianoli, E., and Valladares, F. 2010. Global change and the evolution of phenotypic plasticity in plants. In *Year in Evolutionary Biology*, ed. CD Schlichting, TA Mousseau, pp. 35–55. Malden, MA: Wiley-Blackwell

Mateus, A.R.A., Marques-Pita, M., Oostra, V., Lafuente, E., Brakefield, P. M., Zwaan, B.J., and Beldade, P. 2014. Adaptive developmental

(NE Spain). Global Change Biology 9, 131–140.

Primack, R.B. 1985. Patterns of flowering phenology in communities, populations, individuals and single flowers. In *Population Structure of Vegetation*, ed. J White, pp. 571–93. Dordrecht, The Netherlands: Springer.

Sarup, P., Sorensen, J.G., Kristensen, T.N., Hoffmann, A.A., Loeschcke, V., et al. 2011. Candidate genes detected in transcriptome studies are strongly dependent on genetic background. PLoS ONE, 6:e15644.

Schlichting, C.D., and Pigliucci, M. 1998. *Phenotypic Evolution: A Reaction Norm Perspective*. Sunderland, MA:Sinauer Assoc.

Skrøppa, T., Nikkanen, T., Ruotsalainen, S., Johnsen, O., 1994. Effects of sexual reproduction at different latitudes on performance of the progeny of Picea abies. Silvae Genetica, 43, 297–303.

Smouse, P.E., and Sork, V.L., 2004. Measuring pollen flow in forest trees: an exposition of alternative approaches. Forest Ecology and Management, 197: 21–38.

Sultan, S. E. 1987. Evolutionary implications of phenotypic plasticity in plants. In Evolutionary Biology (pp. 127-178). Springer, Boston, MA.

Urban, M.C. 2015. Accelerating extinction risk from climate change. Science, *348*: 571-573.

Wagner, F., Below, R., Klerk, P.D., Dilcher, D.L., Joosten, H., Kurschner, W.M., and Visscher, H., 1996. A natural experiment on plant acclimation: lifetime stomatal frequency response of an individual tree to annual atmospheric $CO_2$ increase. Proceedings of the National Academy of Sciences U.S.A. 21: 11705–11708.

Woldearegay, M. 2020. Climate change impacts on the distribution and phenology of plants: A review. The Journal of the Society for Tropical Plant Research, 7(1): 196-204

.

plasticity: compartmentalized responses to environmental cues and to corresponding internal signals provide phenotypic flexibility. BMC Biology, 12: 97.

McMahon, S. M., Harrison, S. P., Armbruster, W. S., Bartlein, P. J., Beale, C. M., Edwards, M. E., ... and Prentice, I. C. 2011. Improving assessment and modelling of climate change impacts on global terrestrial biodiversity. Trends in Ecology and Evolution, 26: 249-259.

Menzel, A., Sparks, T.H., Estrella, N., Koch, E., Aasa, A., Ahas, R., ... and Chmielewski, F.M. 2006. European phenological response to climate change matches the warming pattern. Global Change Biology, 12: 1969-1976.

Michaels, S.D. 2009. Flowering time regulation produces much fruit. Curr. Opin. Plant Biol. 12:75–80.

Miller-Rushing, A.J., and Primack, R.B. 2008. Global warming and flowering times in Thoreau's Concord: a community perspective. Ecology, 89:332–41.

Muller-Starck, G., 1988. Genetic implications of environmental stress in adult forest stands. In: Scholz, F., Gregorius, H.R., Rudin, D. (Eds.), Genetic Effects of Air Pollutants in Forest Tree Populations. Springer Verlag, Berlin, Germany, pp. 127–142.

Myers, N., Mittermeier, R.A., Mittermeier, C.G., Da Fonseca, G.A., and Kent, J. 2000. Biodiversity hotspots for conservation priorities. Nature, 403: 853-858.

Parkes, B., Sultan, B., & Ciais, P. (2018). The impact of future climate change and potential adaptation methods on maize yields in West Africa. Climatic Change, 151, 205-217.

Parmesan, C., and Yohe, G. 2003. A globally coherent fingerprint of climate change impacts across natural systems. Nature, 421:37–42.

Penuelas, J., and Boada, M. 2003. A global change-induced biome shift in the Montseny mountains

Water Management in Agriculture
Vol. 11, No. 2, Autumn And Winter 2025, 119-128

نشریه مدیریت آب در کشاورزی
جلد ۱۱، شماره ۲، پاییز و زمستان ۱۴۰۳، ص. ۱۲۸-۱۱۹

# The Effect Of Climate Change On Adaptation and Genetic Diversity in Plant Species

M. Goldani[1]* and S.F. Fazeli kakhki[2]

## Abstract

Climate change has had significant effects on the distribution of species, leading to changes in the composition and functioning of biological communities worldwide. Projections indicate that approximately one in six plant species will become extinct by the year 2100. Recent studies on plant and vegetation extinction rates reveal that the rate of extinction is approximately 2.3 species per year, which is significantly higher than the natural rate of extinction. Climate change, particularly in vulnerable regions, plays a significant role in the loss of genetic diversity among species. These vulnerable areas, which comprise only 1.4% of the Earth's surface, are home to 44% of all species. Unlike evolutionary processes that rely on changes in gene expression, climate change increases diversity, which can impact the evolution of phenotypic plasticity. If there is genetic variation in the degree of plasticity, alleles that enhance desirable plasticity can increase in frequency in response to increased climatic variation. This, in turn, enables organisms to better adapt to diverse environmental conditions. The phenotype of plants is a result of the interplay between the environment, physiology, genetic structure, and the ability to alter the phenotype in response to external conditions (i.e., flexibility and phenotypic changes). This flexibility may provide additional opportunities for adaptation to climate change in the future. When climate change induces changes in allele expression, these allelic changes cannot be considered in isolation; they must be assessed within the genetic network and in the context of environmental influences and the existing genetic map that gives rise to the observed phenotype.

**Keywords**: Climate change, Flexibility, Genotype, phenotype, Species extinction

[1] MSc in Civil Environmental Engineering, Civil Engineering Department, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran
[2] Associate Professor, Khorasan Razavi Agricultural Research and Training Center, Agricultural Research, Training and Extension Organization, Mashhad, Iran
(* Corresponding Author Email: engr.goldani@gmail.com)
Received: 23 Mar 2024
Accepted: 26 Jun 2024