Journal of Research in Horticultural Science
پژوهش در علوم باغبانی
Vol. 4, No. 2 Autumn and Winter 2025 (75–88)
جلد ۴، شماره ۲، پاییز و زمستان ۱۴۰۴ (ص ۸۸-۷۵)
10.22092/rhsj.2026.371319.1138
مقاله علمی مروری
تارنمای مجله: https://rhsj.areeo.ac.ir

نقش ترکیبات ثانویه برگ توت در تغذیه کرم ابریشم و راهکارهای اصلاحی برای توسعه ارقام برگی برتر درخت توت

رحیم عبدالهی[1*] و معین قناعت پرست رشتی[1]
۱- استادیار، مرکز تحقیقات ابریشم کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، رشت، ایران.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۰/۱۶ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۲/۲۰

چکیده
پرورش کرم ابریشم (*Bombyx mori* L.) صنعتی کاملاً وابسته به درخت توت است که برگ‌های آن تنها منبع غذایی لارو محسوب می‌شود. کیفیت و کمیت برگ توت مستقیماً بر سلامت لارو، کیفیت پیله و تولید ابریشم تأثیرگذار است. ترکیبات اولیه مانند پروتئین برگ توت با ارزش غذایی عالی (حاوی اسیدهای آمینه ضروری و خواص عملکردی مانند ظرفیت نگهداری آب بالا) و ترکیبات ثانویه (فنل‌ها، فلاونوئیدها مانند روتین و کورستین، آلکالوئیدها مانند ۱-دئوکسی‌نوجیرمایسین (DNJ) DNJ و گاما-آمینوبوتیریک اسید (GABA) نقش دوگانه‌ای دارند؛ هم مقاومت گیاه به تنش‌ها را افزایش می‌دهند و هم بر فیزیولوژی و تغذیه کرم ابریشم اثر می‌گذارند. کرم ابریشم اهلی طی هم‌تکامل طولانی، مکانیسم‌های مولکولی پیشرفته‌ای از جمله پروتئازهای غیرفعال برای خنثی کردن مهارکننده‌های پروتئاز، هیدرولیز مقاوم به DNJ، جذب پروتئین‌های مفید توت و تنظیم ژنی توسط میکروRNAهای گیاهی را برای غلبه بر واکنش‌های دفاعی توت تکامل داده است. این سازگاری‌ها تعادل دقیق ترکیبات ثانویه در برگ توت را ضروری می‌سازد. برگ توت همچنین پتانسیل بالایی به‌عنوان علوفه پروتئینی پایدار برای دام دارد. انتخاب ارقام با تعادل بهینه مواد مغذی و ترکیبات مفید، همراه با بهنژادی هدفمند، کلید توسعه پایدار نوغانداری است. این مقاله به بررسی نقش مولکولی ترکیبات ثانویه، مقایسه ارقام، چالش‌ها و راهکارهای اصلاحی برای ارقام برگی برتر می‌پردازد.
واژگان کلیدی: برگ توت، کرم ابریشم، ترکیبات ثانویه گیاهی، بهنژادی، نوغانداری.

The Role of mulberry leaf secondary metabolites in silkworm nutrition and breeding strategies for developing superior leaf varieties in mulberry trees

Rahim Abdollahi[1]* and Moein Ghanaatparast-Rashti[1]
1- Assistant Professor, Iran Silk Research Center (ISRC), Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Rasht, Iran.
Received: January 2026 **Accepted: March 2026**

Abstract
Sericulture, the rearing of silkworms (*Bombyx mori* L.), is an industry entirely reliant on the mulberry tree, whose leaves serve as the sole food source for the larvae. The quality and quantity of mulberry leaves directly influence larval health, cocoon quality, and silk production. Primary compounds, such as mulberry leaf protein with excellent nutritional value (containing essential amino acids and functional properties like high water-holding capacity), and secondary compounds —phenolics, flavonoids (e.g., rutin and quercetin), alkaloids (e.g., 1-deoxynojirimycin, DNJ), and gamma-aminobutyric acid (GABA) —play a dual role: they enhance plant resistance to stresses while also affecting silkworm physiology and nutrition. Through long-term co-evolution, the domesticated silkworm has developed advanced molecular mechanisms, including inactive proteases to neutralize protease inhibitors, DNJ-resistant hydrolysis, uptake of beneficial mulberry proteins, and gene regulation by plant microRNAs, to overcome mulberry's defense responses. These adaptations make a precise balance of secondary metabolites in mulberry leaves essential. Mulberry leaves also have high potential as sustainable protein-rich forage for livestock. Selecting cultivars with an optimal balance of nutrients and beneficial compounds, along with targeted breeding, is key to the sustainable development of sericulture. This review explores the molecular role of secondary compounds, compares cultivars, and discusses challenges and corrective breeding strategies for superior leaf varieties.
Keywords: Mulberry leaf, Silkworm, Plant secondary metabolites, Breeding, Sericulture.

*نویسنده مسئول: Abdollahi23465@gmail.com

۱- مقدمه

صنعت نوغانداری یکی از صنایع قدیمی و ارزشمند جهان است که محصول نهایی آن، ابریشم، به‌عنوان ملکه الیاف طبیعی شناخته می‌شود (Rahman and Islam., 2021). موفقیت این صنعت کاملاً به سلامت و کارایی کرم ابریشم (*Bombyx mori* L.) وابسته است که خود، وابستگی کامل به درخت توت (*Morus* spp.) به‌عنوان تنها منبع غذایی دارد (Chundang *et al*., 2020). کیفیت برگ توت نه تنها بر رشد و نمو لاروها، بلکه مستقیماً بر میزان تولید ابریشم، کیفیت الیاف و مقاومت کرم‌ها در برابر بیماری‌ها تأثیر دارد (Vijayan *et al*., 2012).برگ توت سرشار از پروتئین، کربوهیدرات، ویتامین‌ها و مواد معدنی ضروری برای رشد لارو است (Sarkar *et al*., 2017). علاوه بر این، ترکیبات ثانویه گیاهی موجود در برگ، مانند ترکیبات فنولی، فلاونوئیدها و آلکالوئیدها، اگرچه در مقادیر کم وجود دارند، اما اثرات عمیقی بر فیزیولوژی، سیستم ایمنی و متابولیسم کرم ابریشم دارند (Dong *et al*., 2017). این ترکیبات می‌توانند هم خواص پیش‌غذایی و تقویت‌کننده سیستم ایمنی داشته باشند و هم در صورت عدم تعادل، به‌عنوان عوامل ضد تغذیه‌ای عمل کنند (Sharma *et al*., 2022).

در ایران، ارقام وارداتی ژاپنی کنموچی[1] و شین ایچی نویسه[2] در مناطق مختلف ازجمله تربت‌حیدریه، مازندران و خراسان رضوی بالاترین عملکرد را از نظر وزن پیله (۱/۹۵–۲/۲۰ گرم) و درصد قشر پیله (تا ۲۷ درصد) نشان داده‌اند (Alipanah *et al*., 2020، مطهری و همکاران، ۱۳۹۰). این در حالی است که جمعیت‌های بومی توت در استان‌های گیلان، مازندران و به‌ویژه کرمان دارای تنوع مورفولوژیکی و بیوشیمیایی بسیار بالایی هستند و از سازگاری اقلیمی و تحمل تنش‌های محیطی بالایی برخوردارند (Farrokhi Toolir and Mirjalili, 2023; Gharibi *et al*., 2023). تلفیق این دو منبع ژنتیکی (ارقام پربازده خارجی و ژرم‌پلاسم بومی مقاوم) همراه با روش‌های اصلاحی نوین، چشم‌انداز روشنی برای توسعه ارقام برگی چندمنظوره و پایدار در ایران ایجاد کرده است.

بنابراین، شناسایی ارقام توت با ترکیب بهینه از مواد مغذی و ترکیبات ثانویه مفید، برای دستیابی به حداکثر بازدهی در نوغانداری ضروری است. این مقاله به بررسی جامع این موضوع، مقایسه ارقام، چالش‌ها و راهکارهای نوین می‌پردازد.

۲- ارزش غذایی برگ توت و نقش آن در تغذیه کرم ابریشم

برگ درخت توت از بیش از ۵۰۰۰ سال پیش تاکنون، تنها منبع غذایی طبیعی کرم ابریشم بوده و تمامی نیازهای تغذیه‌ای آن را از مرحله لاروی تا تشکیل پیله تأمین می‌کند (Rahman and Islam, 2021). حتی در چین، بزرگ‌ترین تولیدکننده ابریشم جهان، این الگوی تغذیه‌ای سنتی همچنان غالب است، هرچند رژیم‌های غذایی مصنوعی در آزمایشگاه نتایج دلگرم‌کننده‌ای نشان داده‌اند (Liu *et al*., 2023). برگ تازه توت حاوی ۸۰-۷۰ درصد رطوبت و ۳۰-۲۰ درصد ماده خشک است که ترکیبات مغذی و انرژی لازم برای رشد سریع لارو (تا ۱۰۰۰۰ برابر وزن اولیه در ۳۰-۲۵ روز) را فراهم می‌کند.

برای تولید ۱۰۰ گرم ماده خشک بدن لارو، حدود ۱۵۷/۲ گرم ماده خشک برگ توت مصرف می‌شود که شامل ۶۸/۸ گرم پروتئین خام، ۷۴/۶ گرم مواد غیر نیتروژنی محلول (عمدتاً کربوهیدرات‌ها)، ۳۱/۶ گرم کربوهیدرات کل، ۷/۳ گرم خاکستر و شش گرم سایر مواد دفع‌شدنی است (Datta, 2008; Rahman and Islam, 2021). تفاوت ماده خشک مصرفی با ماده خشک بدن لارو (حدود ۵۷/۲ گرم) به‌عنوان سوخت متابولیسم (تنفس و تولید انرژی) مصرف می‌شود. پروتئین خام عمدتاً برای ساخت بافت‌های بدن (رشد ساختمانی) و مواد غیر نیتروژنی محلول برای تأمین انرژی (سوخت و ساز) به‌کار می‌روند. لاروهای نر به‌دلیل فعالیت متابولیکی بالاتر، نیاز کالری بیشتری (تا ۱۵ درصد) نسبت به ماده‌ها دارند و میانگین انرژی مورد نیاز برای پرورش ۱۰۰۰

[1] Kenmochi

[2] Shin Ichinose

لارو در کل دوره لاروی حدود ۶۰۰۰ کیلوکالری است (Singh, 2010).

هضم و جذب مواد مغذی در دستگاه گوارش کرم ابریشم به‌صورت تخصصی انجام می‌شود. قسمت اعظم مدفوع شامل مواد غیرقابل‌هضم (فیبر، سلولز و لیگنین) است و رطوبت آن در سنین مختلف لاروی متفاوت است (از ۸۵ درصد در سن اول تا ۶۵ درصد در سن پنجم). آب، گلوکز و نمک‌های معدنی مستقیماً از دیواره میان‌روده جذب می‌شوند، اما مولکول‌های بزرگ ابتدا هیدرولیز می‌شوند.

پروتئین‌ها: توسط آنزیم‌های پروتئازی شبیه تریپسین به پپتیدها و آمینواسیدها تجزیه شده و پس از عبور از دیواره روده، دوباره سنتز شده و به پروتئین‌های فیبروئین و سریسین ابریشم تبدیل می‌شوند (Vijayan *et al*., 2012).

کربوهیدرات‌ها: نشاسته توسط آمیلاز و مالتاز به گلوکز، و ساکارز توسط ساکاراز به گلوکز و فروکتوز تبدیل‌شده و جذب می‌گردند درحالی‌که گلوکز مستقیماً جذب می‌شود (Sarkar *et al*., 2017).

چربی‌ها: مقدار چربی برگ توت بسیار کم (یک تا سه درصد ماده خشک) است؛ بنابراین، بخش عمده چربی بدن لارو (تا ۸۵ درصد) از تبدیل گلوکز به لیپیدها (لیپوژنز) در سلول‌های چربی تأمین می‌شود. لیپاز موجود در روده، تری‌گلیسیریدهای اندک را به اسیدهای چرب و گلیسیرول تجزیه می‌کند (Chundang *et al*., 2020).

ارزش غذایی برگ توت مستقیماً بر شاخص‌های اقتصادی نوغانداری تأثیر می‌گذارد. برگ‌های با پروتئین بالا (بیشتر از ۲۶ درصد)، قندهای محلول (بیشتر از ۱۷ درصد) و فیبر پایین (کمتر از نه درصد) منجر به وزن پیله بالاتر (تا ۲۵ درصد)، درصد ابریشم خالص بیشتر (دو تا چهار درصد)، طول نخ طولانی‌تر و قابلیت ریسندگی بهتر می‌شوند (Vijayan *et al*., 2012). همچنین، لاروهای تغذیه‌شده با برگ‌های باکیفیت، درصد تبدیل غذایی (ECI[3]) بالاتری داشته و مقاومت بیشتری به بیماری‌های ویروسی و باکتریایی نشان می‌دهند (Rahman and Islam, 2021).

خشبی شدن برگ و زمان برداشت نیز عوامل تعیین‌کننده هستند. برگ‌های جوان (موقعیت یک تا سه از نوک شاخه) پروتئین و رطوبت بالاتر اما فیبر کمتری دارند که برای لاروهای سنین اول و دوم ایده‌آل است. برگ‌های مسن‌تر (موقعیت شش به بعد) فیبر و ترکیبات ثانویه ضد تغذیه‌ای بیشتری دارند که برای لاروهای سن پنجم مناسب‌تر است اما در صورت مصرف بیش‌ازحد، رشد را مختل می‌کند (Sarkar *et al*., 2017). تفاوت ژنتیکی ارقام نیز چشمگیر است؛ ارقام ژاپنی (Kokuso-27 و Shin Ichinose) و چینی (Yu-711) به‌دلیل تعادل عالی مواد مغذی، بازدهی بالاتری نسبت به بسیاری از ارقام محلی دارند (Machii and Katagiri, 2021).

پروتئین برگ توت به‌عنوان یک منبع پروتئین گیاهی نوظهور، دارای ارزش غذایی بسیار بالایی است. این پروتئین حاوی ۱۷ اسید آمینه (شامل همه اسیدهای آمینه ضروری) بوده و نسبت EAA/TAA آن حدود ۰/۳۸ است که نزدیک به استاندارد فائو می‌باشد؛ تنها اسید آمینه محدودکننده متیونین + سیستئین است (Xue *et al*., 2025). پروتئین برگ توت علاوه بر تأمین نیازهای رشد لارو، خواص عملکردی برجسته‌ای مانند ظرفیت نگهداری آب بالا (تا پنج گرم آب به ازای هر گرم پروتئین)، حلالیت خوب و امولسیفیکاسیون دارد که به بهبود هضم و جذب در دستگاه گوارش کرم ابریشم کمک می‌کند. همچنین فعالیت‌های آنتی‌اکسیدانی قوی (جذب رادیکال‌های آزاد) و مهار آنزیم مبدل آنژیوتانسین (ACE[4]) در برگ آن مشاهده شده که می‌تواند مقاومت لارو به تنش‌های اکسیداتیو را افزایش دهد (Xue *et al*., 2025). این ویژگی‌ها توضیح می‌دهند چرا ارقام با پروتئین بالا عملکرد بهتری در نوغانداری دارند.

نتیجه‌گیری عملی: مدیریت توتستان و انتخاب رقم مناسب، پایه و اساس یک نوغانداری سودآور است. تغذیه با برگ‌های باکیفیت، نه‌تنها عملکرد اقتصادی را افزایش می‌دهد، بلکه با کاهش مصرف برگ (بهبود ECI) و کاهش تلفات، پایداری زیست‌محیطی صنعت ابریشم را نیز تضمین می‌کند.

[3] Efficiency of Conversion of Ingested food

[4] Angiotensin-Converting Enzyme

۳- نقش ترکیبات ثانویه برگ توت در پرورش کرم ابریشم

ترکیبات ثانویه گیاهی، ترکیبات آلی هستند که مستقیماً در رشد و نمو گیاه نقش ندارند، اما در دفاع در برابر گیاهخواران، جذب پرندگان برای پراکنش بذر و مقابله با تنش‌های محیطی حیاتی هستند (Dong *et al*., 2017). برگ توت حاوی ترکیبات ثانویه متعددی از جمله فلاونوئیدها (روتین، کورستین، ایزوکورستین)، اسیدهای فنولی (کلروژنیک اسید، گالیک اسید)، تانن‌ها و آلکالوئیدها است. این ترکیبات در غلظت‌های فیزیولوژیک نقش محافظتی برای گیاه ایفا می‌کنند، اما در بدن کرم ابریشم اثرات دوگانه مثبت و منفی دارند که بسته به نوع ترکیب، غلظت و مدت زمان مواجهه متفاوت است.

اثرات مثبت: فلاونوئیدهای خالص‌شده برگ توت اثرات فیزیولوژیک مثبتی بر سیستم عصبی دارند. مطالعات اخیر نشان داده‌اند که این ترکیبات (به ویژه کورستین، کامفرول، مورین و دلفینیدین) با افزایش ترشح GABA و ۵-HT در هیپوتالاموس و هیپوکامپوس، خواب را بهبود می‌بخشند (کاهش ۳۵ درصدی تأخیر خواب و افزایش ۱۲۳ درصدی مدت خواب در مدل‌های حیوانی) و از طریق مسیرهای GABAergic و serotoninergic عمل می‌کنند (Li *et al*., 2025). این مکانیسم می‌تواند در کرم ابریشم نیز به کاهش استرس متابولیکی و بهبود رشد کمک کند، به‌ویژه اینکه فلاونوئیدها فعالیت آنتی‌اکسیدانی و ضدالتهابی دارند. بسیاری از ترکیبات فنولی و فلاونوئیدی برگ توت در غلظت‌های طبیعی (۰/۰۵ تا ۰/۳ درصد وزن خشک برگ) مانند روتین و کورستین خواص آنتی‌اکسیدانی قوی دارند و می‌توانند باعث افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی در بدن کرم ابریشم شده و مقاومت آن را در برابر تنش‌های اکسیداتیو و بیماری‌ها افزایش دهند (Shi *et al*., 2020, Peng *et al*., 2023). برخی مطالعات نشان داده‌اند که این ترکیبات می‌توانند طول دوره لاروی را کاهش داده و وزن پیله را افزایش دهند (Sharma *et al*., 2022, Alfazairy *et al*., 2024).

ترکیبات ثانویه برگ توت، به ویژه فلاونوئیدها (مورین، کورستین) و آلکالوئیدها (DNJ)، اثرات محافظت عصبی قوی دارند که از طریق کاهش استرس اکسیداتیو، مهار آپوپتوز و سرکوب التهاب (کاهش IL-1β و TNF-α) عمل می‌کنند (Chen *et al*., 2025). این ویژگی‌ها نه تنها برای کاربردهای دارویی انسان مفیدند، بلکه می‌توانند مقاومت کرم ابریشم به تنش‌های محیطی و بیماری‌ها را افزایش دهند.

اثرات منفی: در غلظت‌های بالاتر از حد آستانه (بیش از ۰/۵ درصد وزن خشک) یا در شرایط استرس گیاه (خشکی، آلودگی قارچی، سم‌پاشی)، این ترکیبات به عوامل ضدتغذیه‌ای برای کرم ابریشم تبدیل می‌شوند. برخی از آلکالوئیدها و ترکیبات فنولی با غلظت بالا می‌توانند باعث کاهش قابلیت هضم پروتئین، مهار رشد لارو و حتی مرگ و میر شوند (Omotoso, 2015). این ترکیبات می‌توانند با پروتئین‌ها و آنزیم‌های گوارشی کرم ابریشم ترکیبات پیچیده تشکیل داده و از جذب مواد مغذی جلوگیری کنند (Chundang *et al*., 2020). تانن‌ها و اسیدهای فنولی با پروتئین‌های غذایی و آنزیم‌های پروتئاز و آمیلاز ترکیبات غیرقابل‌حل تشکیل می‌دهند و قابلیت هضم پروتئین خام را ۴۵-۲۲ درصد کاهش می‌دهند (Omotoso, 2015; Chundang *et al*., 2020). کورستین با غلظت بیش از یک درصد در جیره مصنوعی وزن لارو را تا ۳۸ درصد و وزن پیله را تا ۳۲ درصد کاهش می‌دهد و دوره لاروی را دو تا چهار روز طولانی‌تر می‌کند (Wang *et al*., 2023).

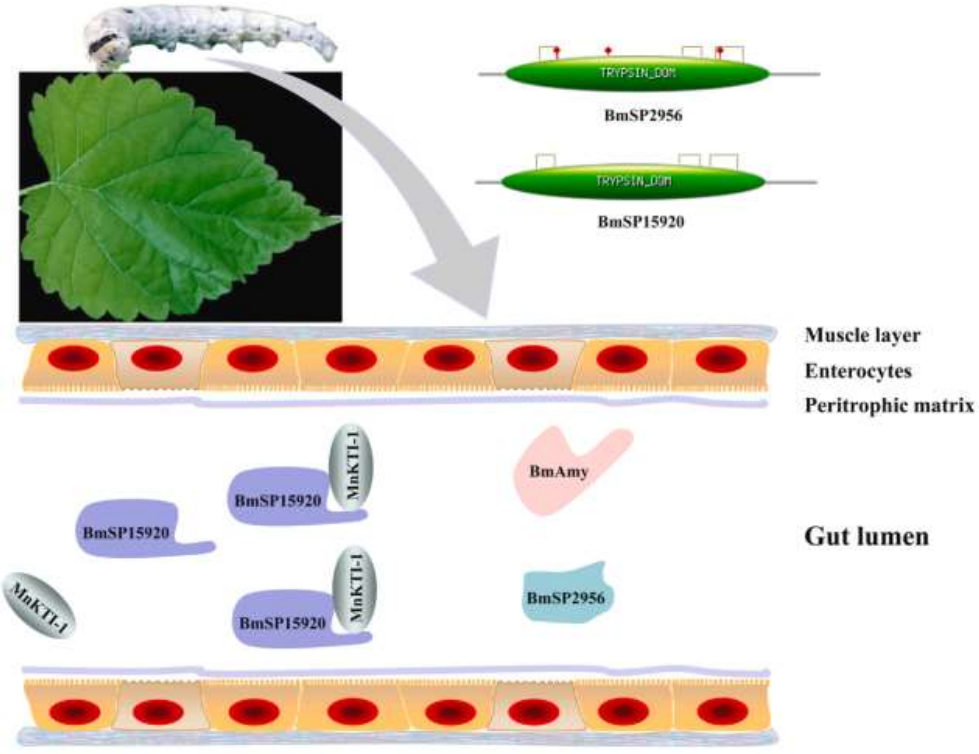
بااین‌حال، کرم ابریشم اهلی (*Bombyx mori*) در طول هزاران سال اهلی‌سازی و هم‌تکامل با درخت توت، مکانیسم‌های مولکولی و بیوشیمیایی متعددی برای خنثی کردن یا حتی بهره‌برداری از این ترکیبات ثانویه تکامل داده است (Liang *et al*., 2025). برای مثال، مهارکننده‌های پروتئاز نوع Kunitz توت (مانند MnKTI-1) که آنزیم‌های گوارشی حشرات را مسدود می‌کنند، در کرم ابریشم توسط پروتئازهای سرینی غیرفعال (مانند BmSP15920) خنثی می‌شوند. این پروتئازهای غیرفعال (که به دلیل جهش در سه‌گانه‌ی کاتالیتیک فعالیت آنزیمی خود را از دست داده‌اند) به مهارکننده توت متصل شده و آن را جذب می‌کنند، در نتیجه فعالیت پروتئازهای فعال (BmSP2956) و آمیلاز حفظ

می‌شود (شکل ۱). این استراتژی نوین، که در سایر آفات لپیدوپتران نیز دیده‌شده، نشان‌دهنده یک مسابقه تسلیحاتی تکاملی است.

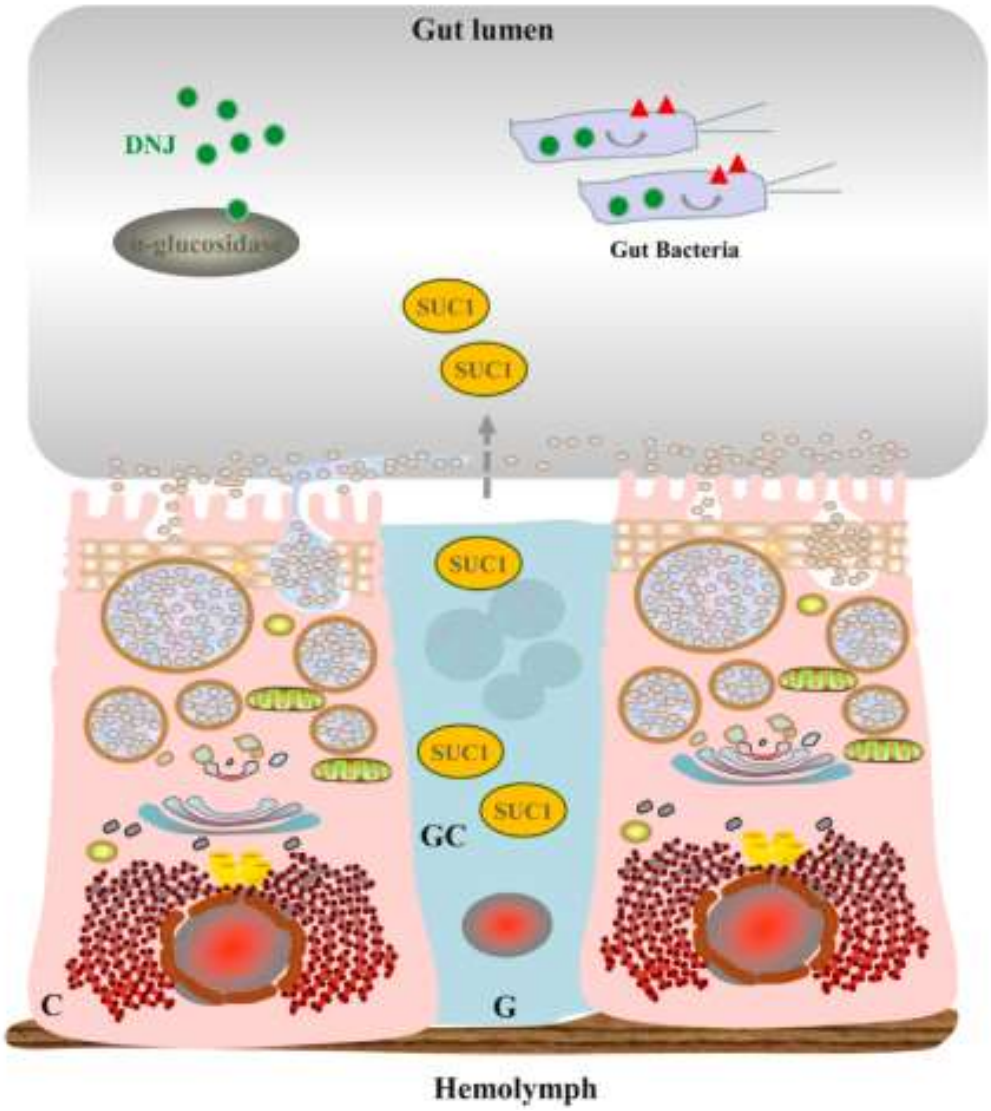
به همین ترتیب، آلکالوئید DNJ که مهارکننده قوی α-گلوکوزیداز است و هضم کربوهیدرات را مختل می‌کند، توسط آنزیم β-fructofuranosidase کرم ابریشم (BmSUC1) دور زده می‌شود. این ژن از باکتری‌ها از طریق انتقال افقی ژن به ژنوم کرم ابریشم واردشده و فعالیت هیدرولیز ساکارز آن تحت تأثیر DNJ قرار نمی‌گیرد (شکل ۲). علاوه بر این، میکروبیوتای روده کرم ابریشم قادر به تخریب DNJ و استفاده از آن به‌عنوان منبع کربن است که یک تعامل سه‌جانبه (کرم-میکروب-توت) را نشان می‌دهد.

این سازگاری‌ها توضیح می‌دهند چرا غلظت‌های طبیعی DNJ و مهارکننده‌های پروتئاز در برگ توت نه تنها برای کرم ابریشم مضر نیستند، بلکه بخشی از رژیم غذایی تخصصی آن محسوب می‌شوند. درک این مکانیسم‌ها اهمیت زیادی در برنامه‌های اصلاحی دارد: کاهش بیش‌ازحد این ترکیبات ممکن است ترجیح تغذیه‌ای کرم ابریشم را مختل کند. میزان و نوع این ترکیبات تحت تأثیر عوامل ژنتیکی (رقم)، شرایط محیطی (نور، دما، تنش‌های آبی و شوری) و شرایط مدیریتی توتستان قرار می‌گیرد (Vijayan *et al*., 2012).

بنابراین ترکیبات ثانویه برگ توت شمشیری دو لبه در پرورش کرم ابریشم هستند: در غلظت‌های طبیعی و متعادل، فلاونوئیدها (به‌ویژه روتین) نقش محافظتی و رشد دهنده دارند؛ اما افزایش غیرطبیعی آن‌ها به اثرات ضدتغذیه‌ای و کاهش عملکرد منجر می‌شود. برای حداکثر کردن سود اقتصادی، توصیه می‌شود که از ارقام توت با محتوای روتین بالا و فنولیک پایین، از برگ‌های مرحله رشد متوسط (۴۰-۳۰ روز پس از هرس) که تعادل بهتری بین فلاونوئیدها و پروتئین دارند، تغذیه شود و از تغذیه برگ‌های آلوده به قارچ یا خشک‌شده اجتناب گردد. بررسی آستانه دقیق تحمل هر ترکیب (روتین کمتر از ۰/۴ درصد، کورستین کمتر از ۰/۱ درصد) برای ارقام مختلف کرم ابریشم نیازمند تحقیقات بیشتر در آینده است.



شکل ۱- کرم ابریشم اهلی از پروتئازهای سرینی غیرفعال (BmSP15920) برای خنثی کردن مهارکننده‌های پروتئاز توت (MnKTI-1) استفاده می‌کند (بر اساس Liang *et al*., 2025).



شکل ۲- استراتژی‌های سازگاری کرم ابریشم اهلی با DNJ توت. برگ توت غنی از DNJ است که با مهار فعالیت α-گلوکوزیداز، هضم کربوهیدرات را در حشرات گیاه‌خوار مختل کرده و سمی است. ژن SUC1 کرم ابریشم از باکتری‌ها از طریق انتقال افقی ژن (HGT) به دست آمده و به‌عنوان هیدرولاز ساکارز عمل می‌کند که نسبت به DNJ حساس نیست. علاوه بر این، باکتری‌های روده قادر به تخریب DNJ و استفاده از آن به‌عنوان منبع کربن هستند. C: سلول ستونی، G: سلول جام‌شکل، GC: حفره سلول جام‌شکل.

۴- مقایسه ارقام مختلف توت از نظر ترکیبات مغذی و ثانویه

ارزیابی ارقام مختلف توت از نظر کیفیت برگ، یک گام ضروری برای انتخاب رقم برتر برای نوغانداری است. کیفیت برگ درخت توت به‌عنوان تنها غذای کرم ابریشم، مهم‌ترین عامل تعیین‌کننده سرعت رشد لارو، وزن پیله، درصد ابریشم و در نهایت سودآوری صنعت نوغانداری است. تفاوت‌های ژنتیکی میان ارقام توت باعث ایجاد تنوع قابل‌توجهی در ترکیبات مغذی اولیه (پروتئین، قندهای محلول، رطوبت و

فیبر خام) و ترکیبات ثانویه (فنولیک‌ها، فلاونوئیدها و تانن‌ها) شده است که این تنوع در مطالعات مقایسه‌ای متعدد به‌خوبی مستند شده است (Ji *et al*., 2021, Zhong *et al*., 2024).

ارقام هندی مانند S-36 و Kanva-2 به دلیل عملکرد برگ بسیار بالا (۲۵ تا ۳۰ تن برگ تازه در هر هکتار در سال) در مزارع بزرگ تجاری موردتوجه قرار گرفته‌اند. با این حال، محتوای پروتئین خام آن‌ها (به‌ترتیب ۲۴/۶ و ۲۵/۱ درصد وزن خشک) و قندهای محلول (۱۶/۲و ۱۵/۸درصد) نسبتاً پایین‌تر از ارقام سایر کشورها است و فیبر خام نیز در محدوده ۱۰/۹ تا ۱۱/۵ درصد قرار دارد (Sarkar *et al*., 2017). در مقابل، ارقام ژاپنی Kokuso-27 و Shin Ichinose با رطوبت بالا (۷۷/۳ تا ۷۸/۱ درصد)، پروتئین خام ۲۷/۲ تا ۲۷/۸ درصد، قندهای محلول ۱۸/۴ تا ۱۹/۱ درصد و فیبر خام کمتر از ۸/۲ درصد، به‌عنوان ارقام ایده‌آل برای تغذیه لاروهای جوان (مراحل یک تا سه) شناخته می‌شوند و مصرف آن‌ها دوره لاروی را ۱۲ تا ۲۴ ساعت کوتاه‌تر می‌کند (Vijayan *et al*., 2012; Machii and Katagiri, 2021).

ارقام چینی Lunjiao-40 و Yu-711 با وجود عملکرد برگ متوسط، بالاترین سطوح ترکیبات ثانویه مفید را دارا هستند؛ به‌طوری‌که غلظت روتین در Yu-711 به ۵/۲ میلی‌گرم بر گرم وزن خشک و در Lunjiao-40 به ۴/۸ میلی‌گرم بر گرم می‌رسد و کل فنولیک‌ها نیز تا ۲۸/۲ میلی‌گرم معادل گالیک اسید بر گرم گزارش‌شده است (Dong *et al*., 2017; Liu *et al*., 2023). این سطوح بالای روتین باعث افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی در همولنف لارو و در نتیجه بهبود دو تا چهار درصدی درصد ابریشم و استحکام فیبر می‌شود (Urbanek Krajnc *et al*., 2022).

در ایران نیز تنوع ژنتیکی گسترده‌ای از توت (صدها اکوتیپ بومی و وحشی) در استان‌های گیلان، مازندران، خراسان، سمنان، فارس و آذربایجان وجود دارد که بخشی از آن در کلکسیون ملی مرکز تحقیقات ابریشم کشور نگهداری می‌شود و مطالعات نشان‌دهنده پروتئین خام قابل رقابت (۲۶/۵ تا ۲۸/۱ درصد) با ارقام ژاپنی است (Alipanah *et al*., 2020; Mirhosseini *et al*., 2022). با این حال، پروفایل دقیق ترکیبات ثانویه (به‌ویژه روتین، کورستین و کلروژنیک اسید) در اکثر جمعیت‌های بومی ایران هنوز به‌صورت جامع بررسی نشده و محتوای روتین گزارش‌شده (۱/۴ تا ۲/۲ میلی‌گرم بر گرم) بر اساس تعداد محدودی از نمونه‌ها به‌دست آمده است (Gharibi *et al*., 2023).

این تفاوت‌ها پیامدهای عملکردی مشخصی دارد. برای مثال، ارقام ژاپنی به دلیل تعادل عالی ترکیبات مغذی، بهترین انتخاب برای پرورش متراکم و دستیابی به وزن پیله بالا هستند و ارقام چینی با روتین بالا برای تولید ابریشم با کیفیت ویژه و مقاومت به تنش‌های اکسیداتیو مناسب‌اند، ارقام هندی برای مزارع گسترده با هدف حداکثر تولید برگ اقتصادی هستند درحالی‌که ارقام بومی ایران به‌ویژه در مناطق با محدودیت آب و نوسانات دمایی، عملکرد پایداری از خود نشان می‌دهند (جدول ۱). بنابراین، رویکرد بهینه در ایران، استفاده ترکیبی از ارقام بومی با پروتئین بالا و ارقام خارجی غنی از فلاونوئید است تا ضمن حفظ سازگاری محلی، کیفیت پیله نیز به حداکثر برسد. به‌طور خلاصه، هیچ رقم جهانی کاملی وجود ندارد و انتخاب رقم باید بر اساس سازگاری با شرایط اقلیمی منطقه، مقاومت به تنش‌ها و هدف نهایی آن (تولید برگ با کیفیت یا کمیت بالا) انجام شود.

این خلأ پژوهشی باعث شده تا عملکرد واقعی ارقام بومی ایران در مقایسه با ارقام خارجی چینی و ژاپنی ناشناخته بماند. بنابراین، انجام مطالعات گسترده‌تر بر روی تنوع ژنتیکی درخت توت ایران و تحلیل هم‌زمان ترکیبات مغذی و ثانویه آن‌ها ضروری است تا ارقام برتر بومی شناسایی‌شده و در برنامه‌های اصلاحی به‌کار گرفته شوند (Hashemi and Khadivi 2020, Alipanah *et al*., 2020).

جدول ۱- مقایسه عملکرد برخی ارقام مهم توت در شرایط ایران و جهان.

رقم	کشور مبدأ	پروتئین خام (٪)	روتین (mg/g)	DNJ (mg/g)	GABA (mg/100g)	وزن پیله (g)	درصد قشر پیله (٪)	عملکرد برگ (تن/هکتار)	ویژگی برجسته
کنموچی	ژاپن	۲۸-۳۳	۲/۸-۴/۲	۲/۱-۳/۰	۲۲۰-۳۱۰	۱/۹۵-۲/۱۵	۲۴/۲۶-۵/۵	۲۲-۳۰	بهترین عملکرد در ایران (Alipanah *et al*., 2020)
شین ایچینویسه	ژاپن	۲۹-۳۴	۳/۰-۴/۵	۲/۳-۳/۲	۲۵۰-۳۵۰	۲/۲-۰۰/۲۰	۲۷-۲۵	۲۴-۳۲	بالاترین پروتئین و قشر پیله
RC-2	هند	۲۴-۲۸	۱/۸-۳/۰	۱/۰-۱/۸	۱۴۰-۲۰۰	۱/۷۵-۱/۹۵	۲۴-۲۲	۲۲-۳۵	تحمل عالی به خشکی و شوری (Prithvi Raje Urs *et al*., 2011)
ارقام محلی گیلان	ایران	۲۶-۳۳	۱/۵-۲/۸	۰/۸-۱/۶	۱۲۰-۲۲۰	۱/۷۰-۱/۹۵	۲۴-۲۲	۱۸-۲۶	سازگاری اقلیمی بالا
ارقام محلی کرمان	ایران	۲۵-۳۱	۱/۲-۳/۰	۰/۷-۱/۵	-	-	-	۱۶-۲۴	تنوع مورفولوژیکی بالا (Farrokhi Toolir, 2023)

۵- اهمیت غربالگری منابع توت برای ویژگی‌های عملکردی

درخت توت به‌عنوان یک گیاه چندمنظوره، فراتر از نقش سنتی خود در صنعت ابریشم، به دلیل برخورداری از ترکیبات زیست‌فعال با ارزش غذایی و دارویی بالا، مورد توجه فزاینده قرار گرفته است. برگ‌های توت منبع غنی از گاما-آمینوبوتیریک اسید (GABA)، ۱-دئوکسی‌نوجیرمایسین (DNJ)، پروتئین با کیفیت بالا و سایر متابولیت‌های ثانویه هستند که اثرات فیزیولوژیک اثبات‌شده‌ای در سلامت انسان و دام دارند. غربالگری سیستماتیک ژرم‌پلاسم توت برای این ویژگی‌های عملکردی نه‌تنها امکان شناسایی ارقام برتر را فراهم می‌کند، بلکه پایه‌ای برای برنامه‌های اصلاحی هدفمند جهت تولید هیبریدهای دو منظوره (علوفه‌ای-دارویی) ایجاد می‌نماید.

گاما-آمینوبوتیریک اسید، به‌عنوان یک نوروترانسمیتر مهاری غیرپروتئینی، اثرات کاهنده فشار خون، آرام‌بخشی، بهبود خواب و آنتی‌اکسیدانی دارد. بررسی ۱۱۹ رقم توت چینی نشان داد که محتوای GABA از ۱۰۸ تا ۵۳۲ میلی‌گرم در ۱۰۰ گرم ماده خشک متغیر است، با میانگین ۲۶۶/۳ میلی‌گرم در ۱۰۰ گرم که حدود ۱۰ برابر چای سبز معمولی است (Yang *et al*., 2016). ارقام برتر مانند Yu-711 (۴۸۷ میلی‌گرم در ۱۰۰ گرم) و Lunjiao-40 (۴۵۲ میلی‌گرم در ۱۰۰ گرم) به‌عنوان ژنوتیپ‌های غنی از GABA شناسایی

شده‌اند، درحالی‌که ارقام هندی مانند S-36 (تنها ۱۳۸ میلی‌گرم در ۱۰۰ گرم) در رتبه پایین‌تری قرار دارند (Wang *et al*., 2022).

۱- دئوکسی‌نوجیرمایسین، آلکالوئید ایمیدازوکر اختصاصی توت، مهارکننده قوی α-گلوکوزیداز است و در کنترل قند خون بعد از غذا تأثیر مفیدی دارد. غربالگری گسترده نشان داد که محتوای DNJ در برگ توت از ۰/۱۲ تا ۴/۸۵ میلی‌گرم در گرم ماده خشک متفاوت است (Ji *et al*., 2021). ارقام چینی Fengchi Sang (۴/۸۵میلی‌گرم در گرم) و Qinglong Sang (۴/۳۲ میلی‌گرم در گرم) بالاترین مقادیر را دارند، درحالی‌که ارقام ژاپنی مانند Kokuso-27 (۱/۸۵میلی‌گرم در گرم) و هندی Kanva-2 (۰/۹۸ میلی‌گرم در گرم) مقادیر متوسطی نشان می‌دهند. ارقام بومی ایرانی در مطالعات محدود، محتوای DNJ بین ۰/۷۸ تا ۱/۶۲میلی‌گرم در گرم داشته‌اند که نیازمند غربالگری گسترده‌تر است (Gharibi *et al*., 2023).

علاوه بر نقش دارویی DNJ برای انسان، این ترکیب به‌عنوان یک عامل دفاعی گیاهی عمل می‌کند، با این حال کرم ابریشم اهلی مکانیسم‌های پیشرفته‌ای برای مقابله با آن تکامل داده است. این کرم دارای ژنی به نام BmSUC1 است که از باکتری‌ها به صورت افقی به آن رسیده است. این ژن آنزیمی به نام ساکاراز تولید می‌کند که در برابر DNJ مقاوم است. اگر این ژن را خاموش یا سرکوب شود، رشد لارو کرم به تأخیر می‌افتد (Liang *et al*., 2025). بنابراین، در غربالگری ارقام توت، نه تنها باید محتوای DNJ بالا (برای کاربردهای غذایی-دارویی) مد نظر قرار گیرد، بلکه حفظ سطحی از DNJ که با سازگاری تغذیه‌ای کرم ابریشم تداخل نداشته باشد نیز ضروری است.

پروتئین خام نیز از دیگر ویژگی‌های عملکردی مهم است. محتوای پروتئین برگ توت بین ۱۹ تا ۳۴ درصد وزن خشک متغیر است و به‌عنوان علوفه پروتئینی با ارزش برای نشخوارکنندگان و تک‌معده‌ها شناخته می‌شود. ارقام ژاپنی Shin Ichinose (۳۲/۸ درصد) و Kokuso-27 (۳۱/۶ درصد) بالاترین مقادیر را دارند، درحالی‌که ارقام بومی ایرانی (گیلان و مازندران) تا ۳۳/۲ درصد پروتئین گزارش‌شده است که حتی از برخی ارقام خارجی نیز بیشتر است (Alipanah *et al*., 2020; Mirhosseini *et al*., 2022). تفاوت‌های موجود در محتوای این ترکیبات تحت تأثیر ژنوتیپ و محیط قرار دارد. عواملی مانند فصل برداشت (برگ‌های پاییزه تا ۴۵ درصد GABA بیشتر)، موقعیت برگ در شاخه (برگ‌های جوان‌تر DNJ بالاتر) و شرایط تنش (کم‌آبی باعث افزایش ۶۰-۳۰ درصدی DNJ و GABA می‌شود) بر تجمع این متابولیت‌ها اثر می‌گذارند (Jin *et al*., 2022). بنابراین، غربالگری صرفاً بر پایه یک مکان و زمان نمی‌تواند پتانسیل واقعی ژرم‌پلاسم را نشان دهد و نیازمند طراحی آزمایش‌های چندمحلی و چندفصلی است.

در ایران، با وجود تنوع ژنتیکی گسترده توت (بیش از ۳۰۰ اکوتیپ بومی شناسایی‌شده)، غربالگری هدفمند برای GABA، DNJ و پروتئین بالا هنوز در مراحل ابتدایی است. این در حالی است که شناسایی حتی یک رقم بومی با عملکرد ترکیبی بالا (مثلاً پروتئین بیشتر از ۳۰ درصد، GABA بیشتر از ۳۵۰ میلی‌گرم در ۱۰۰ گرم و DNJ بیشتر از سه میلی‌گرم در گرم) می‌تواند منجر به ایجاد زنجیره ارزش جدید در تولید چای با ویژگی خاص، مکمل‌های غذایی و علوفه پروتئینی شود. بنابراین، اجرای برنامه‌های غربالگری جامع با استفاده از تکنیک‌های فنوتیپیک (HPLC، GC-MS) و نشانگرهای مولکولی (QTLهای مرتبط با مسیرهای بیوسنتزی GABA و DNJ) ضروری است تا ژرم‌پلاسم برتر برای اصلاح ارقام دومنظوره (نوغانداری-دارو غذایی) شناسایی گردد.

۶- روش‌های اصلاحی برای تولید ارقام مناسب توت برگی

بهنژادی توت برگی طی دهه‌های اخیر با هدف افزایش عملکرد برگ، بهبود کیفیت غذایی (پروتئین، قندهای محلول، ترکیبات زیست فعال مانند GABA و DNJ)، ارتقای سازگاری با تنش‌های غیر زیستی (خشکی، شوری، سرما) و مقاومت به آفات و بیماری‌ها به‌صورت هدفمند پیگیری شده است. این برنامه‌ها نه‌تنها برای صنعت ابریشم، بلکه برای تولید علوفه پروتئینی و محصولات غذایی-دارویی نیز اهمیت یافته‌اند (Sarkar *et al*., 2017; Rohela *et al*., 2020).

۶-۱- انتخاب کلونی (Clonal Selection)

متداول‌ترین و موفق‌ترین روش در بهنژادی توت، انتخاب کلونی است. در این روش، ژنوتیپ‌های برتر از جمعیت‌های طبیعی، باغ‌های سنتی یا کلکسیون‌های ژرم‌پلاسم بر اساس صفات هدف (عملکرد برگ، پروتئین، مقاومت به تنش) شناسایی و از طریق قلمه‌زنی یا پیوند تکثیر می‌شوند. بسیاری از ارقام تجاری پرمصرف جهان حاصل این روش هستند؛ به‌عنوان‌مثال، S-36 و Kanva-2 در هند، Kokuso-27 و Shin Ichinose در ژاپن و Lunjiao-40 در چین همگی از طریق انتخاب کلونی به‌دست‌آمده‌اند (Vijayan *et al*., 2012; Machii and Katagiri, 2021).

۶-۲- دو رگ‌گیری (Hybridization)

دو رگ‌گیری کنترل‌شده بین ارقام با صفات مکمل، امکان ترکیب عملکرد برگ بالا با کیفیت غذایی یا مقاومت به تنش را فراهم می‌کند. به‌عنوان مثال، تلاقی ارقام هندی پربازده (S-36) با ارقام ژاپنی با کیفیت برگ عالی (Kokuso-27) منجر به تولید هیبریدهای F1 با عملکرد ۲۸-۲۲ تن برگ در هکتار و پروتئین ۲۹-۲۶ درصد شده است (Rahman and Islam, 2021). در چین، هیبریدهای سری Jialing و Nongsang از تلاقی ارقام محلی غنی از DNJ با ارقام پربرگ به‌دست‌آمده‌اند که هم برای نوغانداری و هم برای تولید چای مناسب‌اند (Liu *et al*., 2023).

۶-۳- بیوتکنولوژی، کشت بافت و نشانگرهای مولکولی

کشت بافت برای تکثیر سریع و عاری از ویروس ارقام برتر به‌کار می‌رود و در هند و چین به‌صورت تجاری اجرا می‌شود (Sarkar *et al*., 2017). استفاده از نشانگرهای مولکولی (SSR، ISSR، SNP)، امکان انتخاب به کمک نشانگر (Marker-Assisted Selection; MAS) را برای صفات پیچیده فراهم کرده است. به‌عنوان مثال، QTLهای مرتبط با عملکرد برگ، محتوای DNJ و مقاومت به شوری در ارقام چینی شناسایی شده‌اند (Ji *et al*., 2021). همچنین بهره‌گیری از نشانگرهای مولکولی مانند RAPD و ISSR برای غربالگری سریع ژرم‌پلاسم بومی و شناسایی افراد برتر از نظر ترکیبات مفید (DNJ، GABA و روتین) و مقاومت به تنش، زمان و هزینه برنامه‌های بهنژادی را به‌طور قابل‌توجهی کاهش می‌دهد (Awasthi *et al*., 2004; Vijayan *et al*., 2012).

۶-۴- القای پلی‌پلوئیدی (Polyploidy Induction)

القای پلی‌پلوئیدی با کلشی‌سین یا اوریزالین منجر به تولید گیاهان تتراپلوئید با برگ‌های درشت‌تر، ضخیم‌تر، محتوای پروتئین بالاتر (تا ۳۵ درصد) و عملکرد برگ ۲۵–۴۰ درصد بیشتر شده است. ارقام پلی‌پلوئید Triploid AR-12 در هند و Tetraploid Guangdong No. 2 در چین نمونه‌های موفق این روش هستند که هم عملکرد برگ و هم مقاومت به تنش را بهبود بخشیده‌اند (Chundang *et al*., 2020; Rohela *et al*., 2020).

علاوه بر این، یافته‌های اخیر نشان می‌دهند که برخی سازگاری‌های کرم ابریشم به ترکیبات توت از طریق تنظیم cross-kingdom (جذب miRNAهای توت یا پروتئین اوره‌آز توت) رخ می‌دهد (Liang *et al*., 2025). بنابراین، در برنامه‌های اصلاحی باید دقت شود که کاهش بیش‌ازحد ترکیبات ثانویه (مانند DNJ یا مهارکننده‌های پروتئاز) ترجیح تغذیه‌ای یا تنظیم ژنی کرم ابریشم را مختل نکند. استفاده از نشانگرهای مولکولی مرتبط با مسیرهای بیوسنتزی این ترکیبات همراه با آزمون‌های تغذیه‌ای واقعی، می‌تواند به تولید ارقام دو منظوره بهینه (بالا برای نوغانداری + بالا برای کاربردهای دارویی) منجر شود.

ترکیب این روش‌ها (انتخاب کلونی + دو رگ‌گیری + MAS + پلی‌پلوئیدی) امکان تولید ارقام چندمنظوره را فراهم می‌کند که هم‌زمان برای صنعت ابریشم، علوفه پروتئینی و محصولات دارو غذایی (چای GABA/DNJ) مناسب باشند. در ایران، با توجه به تنوع ژنتیکی گسترده و شرایط اقلیمی متنوع، اجرای برنامه‌های اصلاحی ترکیبی با تأکید بر ژرم‌پلاسم بومی و استفاده از فناوری‌های نوین، می‌تواند منجر به تولید ارقام داخلی رقابتی با ارقام خارجی و کاهش وابستگی به واردات نهال شود.

۷- بحث

۷-۱- چالش‌ها و راهکارها در کشت توت برگی

اگرچه درخت توت به‌طور طبیعی گیاهی مقاوم و سازگار با شرایط متنوع اقلیمی است، اما تولید پایدار برگ با کیفیت بالا برای صنعت نوغانداری با چالش‌های متعددی مواجه است که در صورت عدم مدیریت صحیح، می‌تواند عملکرد اقتصادی پرورش کرم ابریشم را به‌شدت کاهش دهد.

۷-۲- چالش‌های اصلی

تنش‌های غیرزیستی ناشی از تغییر اقلیم، به‌ویژه خشکی و شوری، از مهم‌ترین تهدیدها محسوب می‌شوند. این تنش‌ها نه‌تنها رشد رویشی را کاهش می‌دهند، بلکه باعث تجمع بیش‌ازحد ترکیبات ثانویه ضدتغذیه‌ای مانند تانن‌ها و فنولیک‌های اکسیدشده در برگ می‌شوند که قابلیت هضم پروتئین را تا ۴۵ درصد کاهش می‌دهد (Dong *et al*., 2017; Wang *et al*., 2024).

آفات و بیماری‌ها نیز خسارت قابل‌توجهی وارد می‌کنند. بیماری‌های قارچی مانند کپک پودری (*Phyllactinia moricola*) و پوسیدگی طوقه باکتریایی (*Pseudomonas mori*) می‌توانند ۳۰ تا ۵۰ درصد سطح برگ را غیرقابل استفاده کنند (Omotoso, 2015; Karthik *et al*., 2022). در ایران، شیوع لکه قهوه‌ای برگ (*Cercospora moricola*) در توتستان‌های گیلان و مازندران در سال‌های مرطوب گزارش شده است (Hashemi and Khadivi, 2020). علاوه بر بیماری‌ها، برخی آفات کلیدی نیز تهدید جدی برای کمیت و کیفیت برگ توت هستند: کرم برگ‌خوار توت (*Glyphodes pyloalis*)، کرم آمریکایی (*Hyphantria cunea*)، شپشک توت (*Pseudaulacaspis pentagona*) و زنجرک سبز برنج (*Cicadella viridis*) (عبدالهی مصباح، ۱۴۰۴). کنه جوانه توت (*Aceria mori*) به‌عنوان آفات جدید در ایران گزارش‌شده که باعث متورم شدن جوانه‌ها و خشکیدگی شاخه‌ها می‌شود (کمالی و جلائیان، ۱۳۹۰). مدیریت تلفیقی این آفات (IPM) با تأکید بر پایش منظم، استفاده از تله‌های فرمونی، دشمنان طبیعی و در موارد ضروری سم‌پاشی انتخابی، می‌تواند خسارت را به حداقل برساند و از انتقال بیماری‌های مشترک جلوگیری کند (Rohela *et al*., 2020). یکی دیگر از چالش‌های کلیدی، کمبود ارقام سازگار و برتر محلی است. در بسیاری از مناطق ایران، همچنان از جمعیت‌های بومی قدیمی و ناهمگن استفاده می‌شود که عملکرد برگ آن‌ها (۱۵–۱۸ تن در هکتار) به‌طور قابل‌توجهی پایین‌تر از ارقام خارجی پرمحصول (۲۵–۳۵ تن در هکتار) است (Alipanah *et al*., 2020). مدیریت نادرست توتستان‌ها نیز عامل مهمی در کاهش تدریجی کیفیت برگ است. هرس نامناسب (حذف بیش‌ازحد شاخه‌های جوان)، کمبود کودهای نیتروژنی و فسفری، و آبیاری غرقابی یا نامنظم باعث کاهش ۲۰–۳۵ درصدی پروتئین و قندهای محلول برگ می‌شود (Prithvi Raje Urs *et al*., 2011, Chundang *et al*., 2020; Mirhosseini *et al*., 2022).

۷-۳- راهکارهای عملی و علمی

احیاء و غربالگری ذخایر ژنتیکی اولین گام مؤثر است. جمع‌آوری سیستماتیک اکوتیپ‌های بومی ایران (بیش از ۳۰۰ جمعیت شناسایی‌شده) و ارزیابی آن‌ها در شرایط چندمحلی برای شناسایی ژنوتیپ‌های مقاوم به خشکی، شوری و با کیفیت برگی بالا ضروری است (Vijayan *et al*., 2012; Ahsaei *et al*., 2022). اجرای برنامه‌های بهنژادی هدفمند با ترکیب روش‌های سنتی (دو رگ‌گیری) و نوین (MAS و پلی‌پلوئیدی) می‌تواند ارقام جدید سازگار با اقلیم ایران تولید کند. به‌عنوان‌مثال، تلاقی جمعیت‌های بومی مقاوم به کم‌آبی با ارقام خارجی غنی از روتین، هیبریدهایی با عملکرد ۲۸ تن برگ در هکتار و مقاومت بالا به تنش ایجاد کرده است (Rahman and Islam, 2021). مدیریت یکپارچه توتستان شامل آموزش نوغانداران برای اجرای هرس علمی (حفظ نسبت ۲:۱ شاخه‌های یک‌ساله به چندساله)، کوددهی متعادل (N:P:K به نسبت ۱۲۰:۶۰:۴۰ کیلوگرم در هکتار)، آبیاری قطره‌ای (صرفه‌جویی ۴۰ درصدی آب) و کنترل تلفیقی آفات با استفاده از تله‌های فرمونی و قارچ‌کش‌های زیستی، می‌تواند کیفیت برگ را تا ۲۵ درصد ارتقا دهد (Sarkar *et al*., 2017; Rohela *et al*., 2020).

علاوه بر روش‌های بهنژادی ژنتیکی، رویکردهای مکمل غیرژنتیکی نیز می‌توانند به‌سرعت عملکرد نوغانداری را ارتقا

دهند. غنی‌سازی برگ توت با ریبوفلاوین در غلظت ۱۰۰-۵۰ پی‌پی‌ام، روشی ساده، کم‌هزینه و قابل اجرا در توتستان‌های موجود است که وزن لارو را تا ۱۴ درصد و وزن قشر پیله را ۱۰-۱۲ درصد افزایش می‌دهد (رجبی کنف گورابی و همکاران، ۱۳۸۸). در نهایت، تکنیک‌های پس از برداشت نقش مهمی در پایداری تولید دارند. انجماد سریع برگ در منفی ۴۰ درجه سانتی‌گراد یا خشک‌کردن انجمادی (Freeze-drying) می‌تواند ارزش غذایی (پروتئین، GABA، DNJ) را تا ۹۵ درصد حفظ کند و امکان تغذیه کرم ابریشم در فصول کم‌برگ را فراهم سازد (Liao *et al*., 2020; Wang *et al*., 2022). در ایران، استفاده از سیلوهای سردخانه‌ای کوچک در سطح روستایی می‌تواند این فناوری را عملیاتی کند. ترکیب غربالگری ژنتیکی، بهنژادی هدفمند، مدیریت یکپارچه توتستان و فناوری‌های پس از برداشت، نه‌تنها چالش‌های موجود را مرتفع می‌سازد، بلکه می‌تواند ایران را به یکی از پیشگامان تولید پایدار برگ توت با کیفیت بالا در منطقه تبدیل کند.

۸- نتیجه‌گیری کلی

برگ درخت توت به‌عنوان تنها منبع غذایی کرم ابریشم، محور اصلی صنعت نوغانداری است و کیفیت آن تعیین‌کننده نهایی رشد لارو، وزن پیله، درصد ابریشم و سودآوری اقتصادی این صنعت است. ترکیبات اولیه مانند پروتئین برگ توت با ارزش غذایی عالی (حاوی ۱۷ اسید آمینه کامل و خواص عملکردی برجسته) و ترکیبات ثانویه (فلاونوئیدها، DNJ، GABA و فنولیک‌ها) نقش کلیدی در تغذیه و فیزیولوژی کرم ابریشم ایفا می‌کنند (Zhong *et al*., 2024). این ترکیبات در غلظت‌های طبیعی، اثرات مثبت آنتی‌اکسیدانی، محافظت عصبی (از طریق تنظیم گیرنده‌های GABA و ۵-HT) و تقویت سیستم ایمنی دارند (Li *et al*., 2025; Chen *et al*., 2025)، اما در سطوح بالا می‌توانند به عوامل ضدتغذیه‌ای تبدیل شوند.

یافته‌های مولکولی اخیر نشان می‌دهند که کرم ابریشم اهلی طی هزاران سال هم‌تکامل، مکانیسم‌های پیشرفته‌ای برای بهره‌برداری از دفاع‌های شیمیایی توت با استفاده از پروتئازهای سرینی غیرفعال (BmSP15920) برای جذب مهارکننده‌های پروتئاز توت، بهره‌گیری از ژن BmSUC1 (انتقال افقی از باکتری) برای هیدرولیز ساکارز مقاوم به DNJ، جذب پروتئین اوره‌آز توت و تنظیم پس‌از رونویسی توسط miRNAهای توت تکامل داده است (Liang *et al*., 2025). این سازگاری‌ها توضیح می‌دهند چرا کاهش بیش از حد ترکیبات ثانویه در برنامه‌های اصلاحی ممکن است ترجیح تغذیه‌ای یا رشد کرم ابریشم را مختل کند.

ارزیابی ارقام مختلف نشان‌دهنده تنوع ژنتیکی قابل‌توجه در جمعیت‌های بومی ایران و ارقام خارجی است. ارقام ژاپنی با تعادل عالی مواد مغذی، ارقام چینی با سطوح بالای روتین و DNJ، و اکوتیپ‌های بومی ایران با پروتئین بالا و سازگاری اقلیمی، پتانسیل‌های متفاوتی ارائه می‌دهند. علاوه بر نوغانداری، برگ توت به‌عنوان علوفه پروتئینی پایدار برای دام نیز کاربرد دارد (Rohela *et al*., 2025). چالش‌های پیش‌روی کشت توت، از تنش‌های اقلیمی و بیماری‌ها گرفته تا مدیریت نادرست توتستان‌ها و کمبود ارقام بهینه‌شده، تولید پایدار برگ با کیفیت را تهدید می‌کند. غلبه بر این موانع مستلزم رویکردی دوجانبه و یکپارچه است:

نخست، سرمایه‌گذاری هدفمند در برنامه‌های تحقیقاتی شامل احیای ذخایر ژنتیکی، غربالگری چندمحلی برای ویژگی‌های عملکردی (GABA، DNJ، پروتئین) و بهنژادی با استفاده از روش‌های سنتی (انتخاب کلونی و دو رگ‌گیری) و نوین (MAS، پلی‌پلوئیدی و کشت بافت) برای تولید ارقام داخلی چندمنظوره که هم‌زمان برای صنعت ابریشم، علوفه پروتئینی و محصولات غذایی-دارویی مناسب باشند.

دوم، ارتقای دانش و مهارت نوغانداران از طریق آموزش مدیریت یکپارچه توتستان (هرس علمی، کوددهی متعادل، آبیاری قطره‌ای)، و بهره‌گیری از فناوری‌های پس از برداشت (انجماد و خشک‌کردن انجمادی) برای حفظ ارزش غذایی برگ در تمام فصول.

در نهایت، آینده صنعت نوغانداری ایران در تلفیق دانش بومی با یافته‌های مولکولی نوین نهفته است. برنامه‌های اصلاحی باید تعادل دقیق بین افزایش ترکیبات مفید برای انسان (GABA، DNJ) و حفظ سطوح لازم برای سازگاری تغذیه‌ای کرم ابریشم را مد نظر قرار دهند تا ارقام چندمنظوره

پایدار تولید شود و ایران به پیشگام منطقه‌ای در تولید برگ
توت با کیفیت بالا تبدیل گردد.

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

رجبی کنف گورابی، ر.، عبادی، ر.، فضلیتی، م. و میرحسینی، ض. (۱۳۸۸). تأثیر غنی‌سازی برگ توت با ویتامین ریبوفلاوین بر عملکرد اقتصادی و باروری کرم ابریشم *Bombyx mori* L. در استان گیلان. *علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی*، ۱۳ (۴۷)، ۲۳۳-۲۴۲.

عبدالهی مصباح، ر. (۱۴۰۴). فون مهره‌داران بارز، آفات و شکارگرهای آفات توتستان‌های مرکز تحقیقات ابریشم کشور. سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی. شماره مصوب: ۰۲۰۵۲۰-۰۰۴-۲۴-۲۴-۲.

کمالی، ه.، و جلائیان، م. (۱۳۹۰). کنه جوانه توت *Aceria mori* آفت جدید توت سفید در ایران. *فصلنامه گیاه‌پزشکی*، ۳ (۲)، ۲۶۵-۲۷۶.

مطهری، ح.، رضایی، م. و صیداوی، ع. (۱۳۹۰). تأثیر ارقام مختلف برگ توت بر عملکرد کرم ابریشم در استان مازندران. *نشریه علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی*، ۴۰ (۳)، ۵۸-۴۹.

Alfazairy, A. A., Elsakhawy, D. A., El-Meniawi, F. A., Hashem, M., & Rawash, I. A. (2024). Effects of mulberry leaf enrichment with Lepidium sativum L. seed powder suspension on the economic parameters of *Bombyx mori* L. *Scientific Reports*, *14*(1), 19600.

Alipanah, M., Abedian, Z., Nasiri, A., & Sarjamei, F. (2020). Nutritional Effects of Three Mulberry Varieties on Silkworms in Torbat Heydarieh. *Psyche: A Journal of Entomology*, *2020*, 6483427.

Awasthi, A. K., Nagaraja, G. M., Naik, G. V., Kanginakudru, S., Thangavelu, K., & Nagaraju, J. (2004). Genetic diversity and relationships in mulberry (genus Morus) as revealed by RAPD and ISSR marker assays. *BMC Genetics*, *5*(1), 1-5.

Chen, J., Gou, Z., Huang, Y., Yu, Q., Kim, A.N., Shi, W., & Zhou, Y. (2025). Research Progress on Phytochemicals from Mulberry with Neuroprotective Effects: A Review. *Pharmaceuticals*, *18*(5), 695.

Chundang, P., Thongprajukaew, K., Kovitvadhi, U., Chotimanothum, B., Kovitvadhi, A., & Pakkong, P. (2020). Improving the nutritive value of mulberry leaves, Morus spp. (Rosales: Moraceae) for silkworm larvae, *Bombyx mori* (Lepidoptera: Bombycidae) using gamma irradiation. *Journal of Radiation Research and Applied Sciences*, *13*(1), 629-641.

Datta R.K. (2008). Mulberry Cultivation and Physiology. In: Silkworm Rearing Technology. CSB, Bangalore.

Dong, H. L., Zhang, S. X., Tao, H., Chen, Z. H., Li, X., Qiu, J. F., & Xu, S. Q. (2017). Metabolomics differences between silkworms (*Bombyx mori*) reared on fresh mulberry (Morus) leaves or artificial diets. *Scientific reports*, *7*(1), 10972.

FAO. (2023). FAOSTAT: Crops and livestock products. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations. Retrieved November 05, 2025, from https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL

Farrokhi Toolir, J., & Mirjalili, S. A. (2023). Morphological Evaluation of Iranian Mulberry Genotypes in Kerman Province, Iran. *Journal of Agricultural Science and Technology*, *25*(3), 719-731.

Gharibi, H., Ladan Moghadam, A., Alizadeh, M., & Baghdadi, G. (2023). Comparative analysis of morphological and biochemical properties of some Mulberry (*Morus* spp.) genotypes. *Journal of Applied and Natural Science*, *15*(4), 1421-1433.

Gharibi, H., Moghadam, A. L., Alizadeh, M., & Baghdadi, G. (2023). Comparative analysis of morphological and biochemical properties of some Mulberry (*Morus* spp.) genotypes. *Journal of Applied and Natural Science*, *15*(4), 1421.

Hashemi, S., & Khadivi, A. (2020). Morphological and pomological characteristics of white mulberry (*Morus alba* L.) accessions. *Scientia Horticulturae*, *259*, 108827.

Ji, T., Li, J., Shen, Y., Zhang, L., Wang, Y., & Xu, Y. (2021). Variation and correlation analysis of 1-deoxynojirimycin (DNJ) content in 280 mulberry (*Morus spp*.) germplasms. *Food Chemistry*, *342*, 128186.

Jin, Y., Tu, J., Han, X., Zhuo, J., Liu, G., Han, Y., & Xiao, H. (2022). Characteristics of mulberry leaf powder enriched with γ-aminobutyric acid and its antioxidant capacity as a potential functional food ingredient. *Frontiers in Nutrition*, *9*, 900718.

Li, R., Pan, Y., Jing, N., Wang, T., Shi, Y., Hao, L., Zhu, J., & Lu, J. (2025). Flavonoids from mulberry leaves exhibit sleep-improving effects via regulating GABA and 5-HT receptors. *Journal of Ethnopharmacology*, 337, 118734.

Liang, J., Lu, H., Zhong, X., Qin, P., Xiang, Z., & He, N. (2025). Remarkable adaptation of silkworm to mulberry. *Journal of Resource Insects*, *23*(2), 151-168.

Liu, Y., Li, X., Zhang, J., Wang, Q., Chen, H., Zhao, L., & Wang, Z. (2023). Phenolic profiling of mulberry cultivars from different geographical regions. *Industrial Crops and Products*, *192*, 116089.

Machii, H., & Katagiri, K. (2021). Varietal differences in leaf quality and rearing performance of silkworm. *Journal of Sericultural Science of Japan*, *90*(2), 87–94.

Mirhosseini, S. Z., Hosseini, S. A., Seidavi, A., Kadivar, M., & Gharahveysi, S. (2022). Comparative study of local and exotic mulberry varieties on *Bombyx mori* rearing parameters. *Journal of Crop Improvement, 24*(1), 89–102.

Omotoso, O. T. (2015). An Evaluation of the Nutrients and Some Anti-nutrients in Silkworm, *Bombyx mori* L. (Bombycidae: Lepidoptera). *Jordan Journal of Biological Sciences*, *8*(1).

Peng, M., Wang, G., & Zhu, S. (2023). Cold-stored mulberry leaves affect antioxidant system and silk proteins of silkworm (*Bombyx mori*) larva. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, *103*(15), 7673-7682.

Prithvi Raje Urs, M. K., Rajashekar, K., & Sarkar, A. (2011). Evaluation of Mulberry (*Morus spp*.) Genotypes for Tolerance to Major Abiotic Stresses. *Journal of Ornamental and Horticultural Plants*, *1*(3), 167-173.

Rahman, M. S., & Islam, S. M. S. (2021). Studies on food, health and environmental perspectives in mulberry (*Morus* spp.)–A review. *Journal of Bio-Science*, 163-179.

Rohela, G. K., Shukla, P., Kumar, R., & Chowdhury, S. R. (2020). Mulberry (*Morus* spp.): An ideal plant for sustainable development. *Trees, Forests and People*, *2*, 100011.

Sarkar, T., Mogili, T., & Sivaprasad, V. (2017). Improvement of abiotic stress adaptive traits in mulberry (*Morus* spp.): an update on biotechnological interventions. *Biotech*, *7*(3), 214.

Sharma, A., Gupta, R. K., Sharma, P., Duwa, A. K., Bandral, R. S., & Bal, K. (2022). Silkworm as an edible insect: A review. *The pharma innovation journal*, *11*(2), 1667-74.

Shi, G., Kang, Z., Ren, F., Zhou, Y., & Guo, P. (2020). Effects of quercetin on the growth and expression of immune-pathway-related genes in silkworm (Lepidoptera: Bombycidae). *Journal of Insect Science*, *20*(6), 23.

Singh, T. (2010). Principles and techniques of silkworm seed production. Discovery Publishing House.

Urbanek Krajnc, A., Bakonyi, T., Ando, I., Kurucz, E., Solymosi, N., Pongrac, P., & Berčič, R. L. (2022). The effect of feeding with central european local mulberry genotypes on the development and health status of silkworms and quality parameters of raw silk. *Insects*, *13*(9), 836.

Vijayan, K., Srivastava, P. P., Raju, P. J., & Saratchandra, B. (2012). Breeding for higher productivity in mulberry. *Czech Journal of Genetics and Plant Breeding*, *48*(4), 147-156.

Wang, Y., Zhang, L., Liu, J., Chen, X., Li, M., & Zhao, P. (2022). Valorization of discarded mulberry leaves as source of GABA-rich tea. *Industrial Crops and Products*, *178*,114567.

Xue, R., Chen, L., Sun, C., Muhammad, A., & Shao, Y. (2025). Mulberry Leaf Protein: Extraction Technologies, *Functional Attributes and Food Applications. Foods*, *14*(15), 2602.

Yang, R., Guo, Q., Zhang, G., Gu, Z., & Han, Y. (2016). Accumulation of γ-aminobutyric acid in 119 mulberry cultivars. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, *64*(15), 3030–3037.

Zhong, Y., Tong, F., Yan, J., Tan, H., Abudurexiti, A., Zhang, R., Lei, Y., Li, D., & Ma, X. (2024). Differences in the flavonoid composition of the leaves, fruits, and branches of mulberry are distinguished based on a plant metabolomics approach. *Open Life Sciences*, *19*(1), 20220886.