# بررسی نقش میلاتونین در فعالیت‌های فزیولوژیک نباتات

پوهنیار رابعه ایوبی[11]

تقریظ دهنده: پوهنوال گل محمد آژیر

مجـلهی علمی-تحقیقی حـوزهی علوم طـبیعی پـوهـنتون کـابـل، ۳ (۳) ۱۳۹۹

**چکیده**

میلاتونین که به‌نام هورمون تاریکی و سرکادین نیز یاد می شود، یکی از هورمون‌های شناخته شده‌ی حیوانی بوده و برای بار نخست در سال ۱۹۹۵ در نباتات کشف گردید. اما نقش آن در نباتات تا حال به‌طور گسترده مورد تحقیق و بررسی قرار نگرفته است. بر اساس نتایج تحقیقات انجام شده روی چندین species نباتی، موجودیت میلاتونین در قسمت‌های مختلف نباتات چون برگ‌ها، ساقه‌ها، ریشه‌ها، میوه‌ها و تخم‌ها به اثبات رسیده است. مشابهت ساختمانی میلاتونین با مرکبات مهم حیاتی از قبیل تریپتوفان، سیروتونین، اندول استیک اسید و موجودیت یک مسیر مشترک بایوسنتیک میان میلاتونین واکسین، اندول استیک اسید، بیانگر اهمیت این اندول امین بایوجنیک به عنوان یک ماده‌ی تنظیم‌کننده فعالیت‌های حیاتی نباتات می‌باشد. علاوه بر سایر نقش‌های پیشنهاد شده، میلاتونین به‌صورت خاص در فزیولوژی نمو و تولید مثل نباتات از اهمیت ویژه‌ی برخوردار است.

اصطلاحات کلیدی: اندول امین بایوجنیک؛ مطالعه‌ی فایلوجنتیک؛ هورمون نباتی؛ میلاتونین؛ سرکادین

## Evaluation Of The Role Of Melatonin In The Physiological Activities Of Plants

Jr. Teaching Asstt. Rabia Ayoubi

**Abstract**

Melatonin, also called as the dark hormone and circadin, is one of the most well- known animal hormones and was first discovered in plants in 1995. However, its role in plants has not been extensively studied. According to the findings of the researches conducted on several plant species, the presence of melatonin in various parts of plants such as leaves, stems, roots, fruits and seeds has been proven. The structural similarity of melatonin with some vital compounds such as tryptophan, serotonin and indole acetic acid, and the presence of a common biosynthetic pathway between melatonin and auxin, indole acetic acid, indicates the importance of this biogenic indoleamineas a regulator of plant vital functions. In addition to the other suggested roles, melatonin is of particular significance in the physiology of plant growth and reproduction.

Keywords: Biogenic indolamines; Phylogenetic studies; Plant growth Regulator; Melatonin; Circadin

**ارجاع**

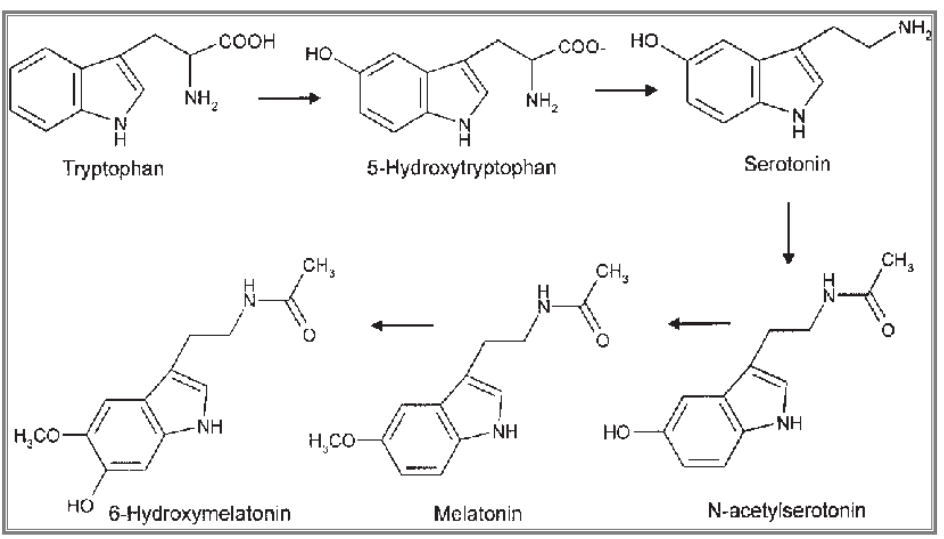
ایوبی، رابعه. (۱۳۹۹). بررسی نقش میلاتونین در فعالیت‌های فزیولوژیک نباتات. مجـلهی علمی- تحـقیقی حـوزهی علـوم طبیعی پوهنتـون کـابل، شماره ۳ (۳)، صص ۱۳۹-۱۵۸.

[11] استاد پوهنځی فارمسی، پوهنتون کابل

**مقدمه**

حدود سه قرن قبل از امروز، دانشمند فرانسوی به‌نام رنه‌دکارت (René Descartes) غده‌ی صنوبری (Pineal gland) را به عنوان صندلی روح توصیف نموده بود، اما میلاتونین به‌گونه‌ی ماده‌ی اصلی ترشح شده از این غده در اواخر دهه‌ی ۱۹۵۰ میلادی شناسایی گردید (۱). میلاتونین که به‌نام هورمون تاریکی و سرکادین نیز یاد می‌شود، برای بار نخست در سال ۱۹۵۸ در خلاصه‌ی غده‌ی صنوبری گاو کشف و توسط Lerner و همکارانش بنام N - استیل- ۵- متوکسی تریپتامین مسمی گردید (۱، ۲). این هورمون در قسمت هسته suprachiasmatic غده‌ی صنوبری حیوانات فقاریه، به ویژه پستانداران، و به‌صورت موضعی در حجرات و انساج دیگر چون شبکیه‌ی چشم، سیستم‌هاضمه، پوست، مخ عظم و لمفوسیت‌ها، تولید گردیده و بنابر توانایی آن در تجمع گرانول‌های میلانین و در نتیجه براق و درخشان نمودن رنگ‌پوست بعضی ماهی‌ها، چلپاسه‌ها و بقه‌ها، به‌نام میلاتونین یاد می‌گردد (۳، ۴).

بیوسنتیز میلاتونین به صورت زمان‌بندی شده (در جریان شب) و هماهنگ با دوران روشنی/ تاریکی صورت گرفته و مراحل تولید آن توسط دو انزایم کلیدی هر یک ارایل الکایل امین N- استایل ترانسفراز (AANAT) وهایدروکسی اندول- O- میتایل ترانسفراز (HOMT) که تا حد زیادی محدود به غده‌ی صنوبری هستند، از پریکرسر آن (امینو اسید تریپتوفان) کتلیز می‌گردد (شکل ۱). طوری‌که امینواسید تریپتوفان ابتدا توسط انزایم تریپتوفان هایدروکسیلاز (TH) به ۵- هایدروکسی تریپتوفان تبدیل شده و این مرکب در اثر دی کاربوکسیلیشن باعث تولید سیروتونین می‌گردد. سنتیز میلاتونین از سیروتونین به واسطه‌ی انزایم‌های AANAT و HOMT صورت می‌گیرد.




شکل ۱: مراحل سنتیز میلاتونین از پریکرسر آن (امینو اسید تریپتوفان) توسط انزایم‌های کلیدی AANAT و HOMT (۵).

با توسعهی تحقیقات و معلومات موجود در مورد میلاتونین، در حال‌حاضر از آن من‌حیث هورمون تعدیل‌کنندهی خُلق و خو، خواب، فزیولوژی شبکیه، خصوصیات جنسی، فزیولوژی تناسل فصلی، نظم دوران شبانه‌روزی، تقویت‌کنندهی سیستم معافیت، منع‌کنندهی نموی تومور و جلوگیری‌کنندهی پیری زودرس، نام برده می‌شود (٦، ٨). بر علاوه، میلاتونین دارای تأثیر ضد اپپتوز بوده و این فعالیت آن حتی در حالت ایسکمی نیز اعمال می‌گردد (۴). از خاصیت محافظت‌کننده حجره توسط میلاتونین جهت درمان بیماری‌های استحالوی عصبی استفاده به‌عمل آمده و خاصیت کرونوبیوتیک آن در درمان انواع اختلال نظم شبانه‌روزی از جمله خواب، مؤثر است (۴). اما با آن‌هم، نقش میلاتونین در فزیولوژی و پتوفزیولوژی انسان تا حال حاضر به صورت دقیق واضح نبوده و نیازمند تحقیقات بیشتر است.

از جمله سایر فعالیت‌های فزیولوژیک مرتبط به میلاتونین، می‌توان به ظرفیت انتی‌اکسیدانت آن جهت کنترول و خنثی نمودن رادیکال‌های آزاد و سایر مالیکول‌های اکسیداتیف مضر تولید شده در سیستم بیولوژیک من‌جمله حجرات نباتی، افزایش بیان انزایم‌های با فعالیت انتی‌اکسیدانت، کاهش فرار الکترون از مایتوکاندریا و تداخل در مسیرهای سیگنالینگ میدیاتورهای التهابی اشاره نمود (۹، ۱۱).

میلاتونین یک مالیکول با تأثیر مستقیم خنثی‌کنندهی رادیکال‌های آزاد و یک انتی‌اکسیدانت غیر مستقیم بوده و به عنوان یک انتی‌اکسیدانت، ویژه‌گی‌های خاصی را دارا می‌باشد. چنان‌چه این مالیکول هیچ نوع خاصیت پرو-اکسیداتیف نداشته، در حالی‌که محصولات بین البینی تولید شده در حین سم‌زدایی رادیکال‌های آزاد توسط آن خود انتی اکسیدانت‌های بسیار مؤثر بوده و به‌گونه‌ی جمعی با سایر انتی اکسیدانت‌ها چون اسکوربیک اسید، گلوتاتیون و غیره در خنثی نمودن رادیکال‌های آزاد سهم می‌گیرند (۱۰). بر علاوه، میلاتونین فعالیت چندین انزایم انتی اکسیدانت را افزایش داده و بدین‌وسیله باعث بهبود عملکرد آن‌ها جهت محافظت ماکرومالیکول‌ها در برابر اکسیداتیف استرس می‌گردد (۱۰).

در اوایل عقیده براین بود که میلاتونین به‌گونه‌ی یک مالیکول پیام رسان تنها در حیوانات موجود می‌باشد، در حالی‌که در مطالعات بعدی از آن به عنوان یک مالیکول فایلوجنتیک حفظ شده و قدیمی نام برده شده است (۱۲). چنان‌چه موجودیت میلاتونین در سیانوباکتریای ابتدایی، فنجی، الجی‌های سرخ و سبز و نباتات تأیید گردیده است (۴). گزارشاتی که بعد از سال ۱۹۸۰ به ثبت رسیده است، حضور میلاتونین را در موجودات غیر فقاری از قبیل حشرات، سخت پوستان، Planarians و غیره نشان می‌دهد (۱۳). در سال ۱۹۹۱، حدوداً ۳۰ سال بعد از کشف میلاتونین نزد پستانداران، این مرکب پلیوتروپیک در الجی یک حجروی Ganyaulax polyedra و بعداً نزد سایر داینوفلاجیلات‌ها

(Lingulodinium polyedrum) و الجی‌های سبز شناسایی گردید (۱۴). معلومات در رابطه به وجود میلاتونین در گلسنگ‌ها تا هنوز به‌دست نیامده و اطلاعات اندکی در مورد موجودیت میلاتونین و نقش آن در باکتریا، فنجی‌ها و نباتات پست قابل دست‌رس می‌باشد (۱۵).

با آن‌که، میلاتونین بنابر انتشار گسترده‌ی آن در موجودات زنده من‌جمله نباتات، اهمیت آن جهت پیشبرد فعالیت‌های مختلف فزیولوژیک و تأثیر بالای ترکیب فایتوکیمیاوی نباتات، اخیراً توجه زیادی را به خود جلب نموده است، اما با این حال، تعداد اندکی مقالات در رابطه به نقش این مالیکول در تنظیم فزیولوژی نباتات موجود است. این مقاله در برگیرنده‌ی معلومات مختصر در مورد ابعاد مختلف اهمیت میلاتونین در فزیولوژی نباتات بوده تا باشد نقش این مالیکول هورمونی به‌عنوان تنظیم‌کننده‌ی فعالیت‌های فزیولوژیک نباتات دور از احتمال به نظر نرسد.

**نقش‌های فزیولوژیکی احتمالی میلاتونین در نباتات**

میلاتونین یک مالیکول با وظایف مشخص بیولوژیک بوده که به صورت گسترده در موجودات زنده انتشار یافته است (۳، ۱۶). این مالیکول بنابر فعالیت‌های فزیولوژیک متعدد آن در دهه‌ی اخیر توجه زیادی را به‌خود جلب نموده است. تولید میلاتونین محدود به پستانداران نبوده، بلکه ترشح این ماده در عضویت فقاری‌های غیر پستاندار، غیر فقاری‌ها و بسیاری از نباتات با عین ساختار مالیکولی به اثبات رسیده است (۶، ۱۷).

بر اساس مطالعات انجام شده، امین‌ها رول بسیار مهم را در فزیولوژی سیستم عصبی حیوانات به عهده داشته و از وجود شان در نباتات نیز گزارش‌ها ثبت گردیده است (۱۳) از این جمله، میلاتونین یکی از فراوان‌ترین امین های بیولوژ یک موجود در عالم نباتات به‌شمار می‌رود (۱۳). وجود میلاتونین در نباتات دو دهه قبل تأیید گردید و بعد از آن تحقیقات متعدد جهت اثبات اهمیت طبی و مغذی آن نزد انسان‌ها و نباتات روی دست گرفته شده است. با آن‌که تا فعلاً نقش اصلی میلاتونین نباتی به‌طور کامل دانسته نشده است، ولی به نظر می‌رسد که نقش میلاتونین در نباتات مشابه به اهمیت آن در حیوانات باشد (۱۲).

شواهد تأیید کرده است که، نباتات قادر اند تا بخش عمده‌ی از میلاتونین مورد نیاز خویش را خود تولید نمایند، با آن‌که هومولوگ ارایل الکایل امین N- استایل ترانسفیراز (AANAT) تا هنوز در نباتات شناسایی نشده است. بنابراین، ممکن است انزایم N- استایله‌کننده‌ی سیروتونین موجود در نباتات از نظر توالی و ساختمان با AANAT حیوانات تفاوت زیادی داشته باشد (۱۷).

موجودیت و اهمیت میلاتونین از نقطه نظر تکامل برای بار نخست توسط Hardeland در موجودات فوتوتروف مورد مطالعه و بررسی قرار گرفت. طوریکه وی بعد از مطالعات همهجانبهی میلاتونین را از جمله هورمون های نباتی شمرد. در سال ۱۹۹۳، موجودیت میلاتونین در نیلوفر پیچ جاپانی (*Ipomoea nil*) و در سال ۱۹۹۵ نزد نباتات عالی برای بار نخست، کشف گردید (۱۳، ۱۴).

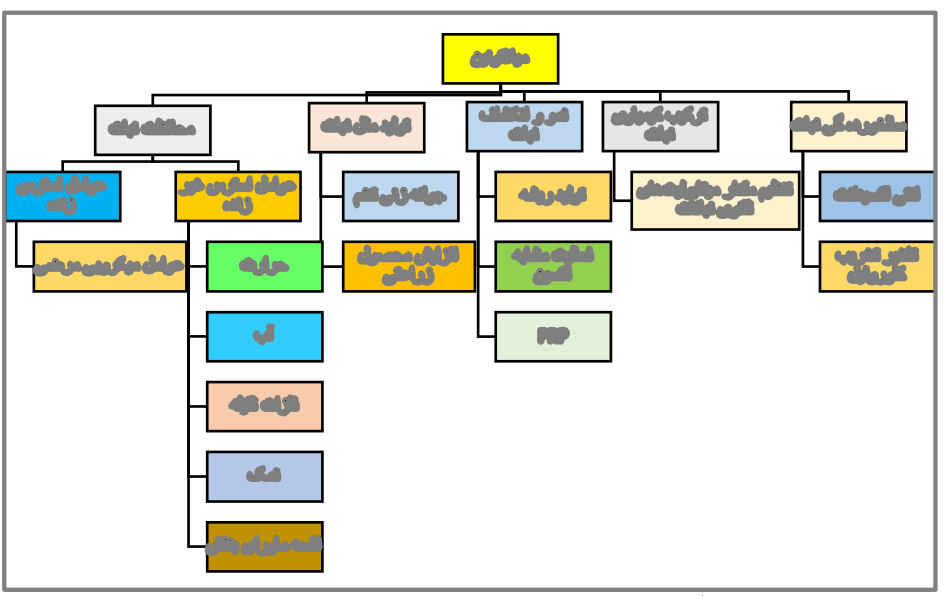
میلاتونین در بسیاری از species های نباتی شناسایی شده است. نتایج تجارب اجرا شده روی نمونههای نباتی یک مشیمهیی و دو مشیمهیی با ارزش طبی و غذایی حاکی از موجودیت میلاتونین به مقادیر مختلف (از پیکوگرام- مایکروگرام فی گرام نبات) در ریشه، ساقه، برگ، میوه و دانه انواع مختلف نباتات بوده و این مقدار متأثر از نوع نبات، عضو و وراثتی؛ شرایط محیطی، پروتوکول استخراج و تکنیک استفاده شده جهت تعیین مقدار میلاتونین در مواد نباتی میباشد (۱۸). با آنهم، اعضای مؤلد نبات از قبیل گلها و دانهها مخصوصاً دانههای حاوی تیل شحمی و اعضای نباتی که در معرض مقادیر بلند اشعهی ماورای بنفش قرار دارند (برگهای نباتات) حاوی بیشترین مقدار میلاتونین (در بعضی موارد بیشتر از غلظت آن در انساج حیوانات فقاریه) و میوهها کمترین مقدار آنرا دارا میباشند (۱۸، ۱۹). سویهی بلند میلاتونین در دانهها بهحیث یک انتی اکسیدانت عمل نموده و باعث زنده ماندن تخم و ظرفیت جوانهزنی آن میگردد (۱۸). عواملی چون در دسترس بودن پریکرسر، کتابولیزم، سهم نسبی ایزو انزایم های مسیر بایوسنتیز میلاتونین و تفاوت در محدودیت سرعت توسط سیروتونین N- استیایل ترانسفراز یا N- استیل سروتونین O- میتایل ترانسفراز، میتواند غلظت میلاتوئین را در نباتات تحت تأثیر قرار بدهد (۱۸).

مطالعات انجام شده روی میلاتونین نباتی تا حال حاضر بالای تعیین مقدار آن در نباتات منبع و نقش آن در رژیم غذایی انسانها تأکید داشته است. چنانچه این مادهی هورمونی به غلظت بلند در نوشیدنی ها (قهوه، چای و آب جو) و غلهجات (جواری، برنج، گندم، جو، جودر) قابل دریافت بوده و روزانه ملیاردها نفر در سراسر جهان از این محصولات استفاده مینمایند (۱۷).

در جمع نباتات مطالعهشده، موجودیت میلاتونین در نباتات طبی مورد دلچسپی خاص قرار گرفته است. زیرا از این نباتات بهطور سنتی جهت رفع مشکلات خواب، یا بهگونهی ضد افسردهگی استفاده به عمل میآید. بعضی از نباتات طبی و غیر طبی که از سویهی بلند میلاتونین (میکروگرام/ گرام وزن خشک نبات) برخوردار اند، شامل گل راعی (Hypericum perforatum)، Tanacetum parthenium و بعضی از نباتات بومی چین، میباشد (۲۰، ۲۲).

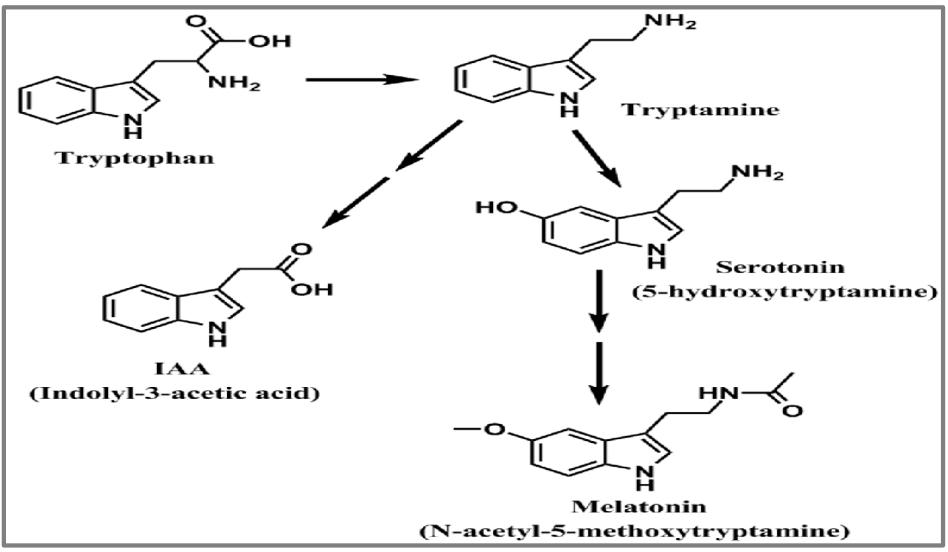
بر اساس گزارشات به‌دست آمده از مصر، موجودیت سیروتونین، تریپتامین و میلاتونین به مقادیر مختلف در ترکیب بعضی از نباتات با ارزش طبی و غذایی به اثبات رسیده است. به‌طور مثال، فی گرام کیله‌ی پخته و نیمه‌پخته به ترتیب حاوی ۳۱. ۴ و ۱۸,۵ نانوگرام سیروتونین بودند. به همین ترتیب فی گرام غله‌جات از قبیل جواری، برنج، جو و زنجبیل به ترتیب حاوی بیشترین مقدار میلاتونین در حدود ۱۸۷,۸، ۱۴۹,۸، ۸۷,۳ و ۱۴۲,۳ نانوگرام بوده در حالی‌که فی گرام انار و توت زمینی کم‌ترین مقدار اندول امین‌ها (۸- ۱۲ نانوگرام سیروتونین، ۴-۹ نانوگرام تریپتامین و ۱۳- ۲۹ نانوگرام فی صد گرام میلاتونین) را دارا بودند (۲۳).

رابطه میان میلاتونین و ترکیب فایتوکیمیاوی نباتات به طور گسترده مورد مطالعه قرار گرفته است. با آن‌که تا حال تعداد اندکی از مقالات نشر شده در ارتباط به نقش احتمالی میلاتونین در نباتات موجود می باشد. با در نظر داشت یافته‌های مطالعات و معلومات موجوده، میلاتونین نباتی در تعداد زیادی از اعمال فزیولوژیک از جمله رشد و مورفوجنیز (فعالیت مشابه به اکسین)، تولید ریشه، جوانه زدن تخم، ترکیب ضیایی، تنظیم آسموس، رشد تکثری نباتات من‌جمله نظم دوران شبانه‌روزی، به گونه‌ی انتی اکسیدانت جهت محافظت حجره در برابر عوامل تنش‌زای زنده و غیر زنده، ثبات وضعیت ریدوکس حجره و تأخیر سال‌خوردگی نباتات نقش مؤثر را دارا بوده و در اکثریت موارد باعث ایجاد تغییرات اساسی در ترانسکرپتوم حجره می‌گردد (شکل ۲) (۱۱، ۱۲، ۱۶، ۲۴). اخیراً، اولین آخذه‌ی میلاتونین نباتی در *Arabidopsis thaliana* شناسایی و مشخص گردیده است (۲۵).



شکل ۲: تصویر کُلی از اهمیت میلاتونین در فعالیت‌های مختلف فزیولوژک نباتات (۲۶، ۲۷).

مراحل نمو و انکشاف نباتات توسط انواع مختلف تنظیمکنندههای رشد نباتی متأثر میگردد. یکی از این مالیکولها اکسین است. میلاتونین با یکی از مشتقات اکسین یعنی اندول- ۳- استیک اسید (IAA)، دارای پریکرسر مشترک (امینو اسید تریپتوفان) بوده (شکل ۳) و این تشابه ساختمانی باعث می شود تا نقش میلاتونین به عنوان یک جاگزین/کاندید در پرو سهی نمو و انکشاف نباتات دور از احتمال به نظر نرسد (۲۸).




شکل ۳: شیمای سنتیز میلاتونین و اندول استیک اسید از پریکرسر مشترک، امینو اسید تریپتوفان (۲۹).

در یک تحقیق انجام شده روی ساختمان ریشهی بادرنگ، میلاتونین باعث تقویت تشکل ریشههای جانبی و اتفاقی شده و این تعدیلات با تغییرات جزیی در نموی موهای ریشه و بدون هیچ نوع دگرگونی ملموس در نموی ابتدایی ریشه به همراه بوده است (۳۰). بر علاوه در نزد نباتات یک مشیمهیی چون گندم، جو، جودر، Phalaris arundinacea و بعضی از دو مشیمهیی ها چون Arabidopsis thaliana، میلاتونین به عنوان یک هورمون نباتی هم مانند اکسین در نظر گرفته می شود (۳۱). مؤثریت میلاتونین جهت تحریک انکشاف مشیمههای بیرنگ (etiolate cotyledon*s*) در .Lupinus albus L در مشابهت نزدیک با فعالیت اندول-۳- استیک اسید در این خصوص قرار دارد (۳۲).

اکثریت تأثیرات نسبت داده شده به میلاتونین وابسته به غلظت بوده و غلظتهای مختلف آن مسئول تأثیرات متفاوت اند. این پدیده را میتوان بهتر در نبات Arabidopsis thaliana توضیح نمود. چنانچه میلاتونین به غلظت های پائین (۱۰-۲۰ مایکرو مولار) هیچ نوع تأثیری در تطویل ریشه

نداشته، در حالی‌که غلظت‌های بلندتر آن (۲۰۰- ۴۰۰ مایکرو مـــولار) از نمو و انکـــشاف ریشه‌ی نبات جـلوگیری مـی‌نماید. میلاتونین به غلظت ۴۰ مایکرو مـولار نمو و انکشاف نبات را تحـریک می‌نماید (۳۳).

میلاتونین به عنوان یک مالیکول پیام‌رســـان، نظم شـــبانه‌روزی (circadian rhythm) را در نباتات تنظیم می‌نماید. موجودیت نظم شـــبانه‌روزی در ســـویه‌ی میلاتونین نزد الجی‌های یک حجروی و نباتات عالی، بیان‌گر نقش این مالیکول در تنظیم پدیده‌های نوری و ریتمیک بوده و تشـــابه عملکرد میلاتونین را در حیوانات و نباتات بیان می‌نماید (۱۶). بر اســـاس نتایج تحقیقات گزارش داده شـــده، غلظت میلاتونین در Chenopodium rubrum در طول دوره‌ی ۱۲ســـاعته‌ی شـــب/ روز به‌صـــورت منظم تغییر می‌نماید و این خود بیان‌گر نقش میلاتونین در کنترول نظم شبانه‌روز در نبات است (۳۴).

استفاده‌ی میلاتونین به صورت خارجی می‌تواند انکشاف گل را در مراحل ابتدایی دوره‌ی نوری متأثر بســـازد. تجارب انجام شـــده بالای جوانه‌های Chenopodium rubrum نشـــان می‌دهد که پروســـه‌ی گل‌دهی، بدون هیچ نوع تغییر ملموس در مدت زمان دوره‌ی نوری، بعد از تطبیق میلاتونین (۱۰۰- ۵۰۰ مایکرو مولار) در نهال‌های مواجه شده با دوز واحد عامل محرک تاریکی به مدت ۱۲ ساعت، کاهش یافته است (۳۵). نتایج این مطالعات، بیان‌گر ظرفیت میلاتونین در تأخیر تحریک تشکل گل نزد بعضی از نباتات فوتوپریودیک و استفاده از آن به عنوان جاگـزین تاریکـی جهت تشکل cyst در داینوفلاجیلات Lingulodinium می‌باشـــد. علاوتاً تطبیق میلاتونین باعث افـــــزایش اندازه‌ی بـــــرگ‌ها، ارتفاع/ قد و تعداد دانه‌های سویا شده و به این ترتیب رشد و تولید دانه را در نبات بهبود می‌بخشد (۳۴).

اطلاعات جدید نشـــان‌دهنده اهمیت میلاتونین در تنظیم پروســـه‌ی ســـال‌خوردگی (senescence)، فعال‌ســـازی عکس‌العمل‌های دفاعی، باروری و انتقالات مرحله‌ی نموی نباتات بوده و ظرفیت انتی اکسـیدانتی و محرک رشـد میلاتونین را عامل اثرگذار در ایفای این فعالیت‌ها می‌دانند (۲۸). مؤثریت تطبیق میلاتونین در تنظیم پروسه‌ی سال‌خوردگی نباتات می‌تواند به‌صورت بسیار واضح از تأثیر آن در تأخیر تخریب کلوروفیل در برگ‌های جو، بیان گردد (۳۶). بر اساس یک تحقیق دیگری‌که بالای برگ‌های تجریدشـده‌ی سـیب صـورت گرفت، نشـان داده شـد که تطبیق میلاتونین (۱۰ ملی مولار) باعث به تأخیر افتادن کاهش سویه‌ی کلوروفیل و کارایی سیستم نوری شده و در نتیجه مانع پروسه‌ی ســـال‌خوردگی ناشـــی از تاریکی در نبات می‌شـــود (۳۷). با در نظرداشـــت شـــواهد موجود، به نظر

میرسد که میکانیزم اساسی کارگرفته شده توسط میلاتونین جهت تنظیم پروسه سالخوردهگی در نباتات، دوران اسکوربات-گلوتاتیون باشد (۳۷، ۳۸).

پروسه پخته شدن محصول پس از برداشت (PRP) و بهبود کیفیت نباتات با ارزش غذایی، از جمله سایر مواردی است که جهت حصول نتایج قناعتبخش آنها تطبیق میلاتونین مؤثر ثابت شده است. تجربهی انجام شده روی بادنجان رومی نشان داده است که معامله نمودن محصول برداشت شده با محلول ۵۰ مایکرو مولار میلاتونین به مدت ۲ ساعت باعث افزایش سویهی بیان جینهای کلیدی که مسئول تولید رنگ در میوه اند، میگردد (۳۹). بر علاوه، بعد از تطبیق میلاتونین، سرعت تبخیر آب از میوههای بادنجان رومی، بیان جینهای اکواپورین و هورمون نباتی ایتلین در محصول افزایش قابل ملاحظه نموده است (۳۹).

علاوه براین، شواهد موجود نشان میدهد که میلاتونین میتواند باعث افزایش تولید محصولات زراعتی گردد (۱۷). نقش میلاتونین در حفظ کلوروفیل، بهبود ترکیب ضیایی و تحریک نموی ریشه از جمله میکانیزمهای احتمالی اند که ممکن در افزایش تولید محصولات زراعتی توسط میلاتونین اهمیت داشته باشند. نباتات ترانس جنیک با محتوای میلاتونین افزایش یافته، احتمالاً میتوانند منجر به دستیابی به موفقیت در افزایش تولید محصولات زراعتی گردند (۱۷).

عملکرد اصلی میلاتونین در نباتات به عنوان اولین خط دفاعی در برابر عوامل استرس زای اکسیداتیف داخلی و محیطی است. تصور بر این است که در مقایسه با حیوانات، نباتات از سویهی بالاتر میلاتونین برخوردار بوده و از آن به عنوان وسیلهای جهت مقابله با فشارهای محیطی استفاده مینمایند (۱۷).

میلاتونین با داشتن فعالیت انتی اکسیدانت و تنظیمکنندهی نمو، مقاومت نباتات را در برابر عوامل استرسزای زنده و غیر زنده افزایش میدهد (۴۰). تحقیقات جهت دریافت میکانیزم دقیق این فعالیتهای میلاتونین جریان دارد. نتایج اکثریت مطالعات انجام شده نشان میدهد که تطبیق میلاتونین و یا تولید شدن آن بهصورت داخلی باعث بلند بردن مقاومت نباتات در برابر عوامل استرسزای غیر زنده از جمله حرارت، فیصدی بلند نمک، کمبود/ تنش آب، اشعهی ماورای بنفش، فلزات ثقیله و غیره میگردد.

تأثیر محافظوی میلاتونین در برابر استرس ایجادشدهی ناشی از هوای سرد و گرم، در نباتات اخیراً ثابت شده است. چنانچه در یک آزمایش انجام شده روی زردک، میلاتونین مرگ حجروی تحریک

شـده توسـط حرارت سرد (سـه درجه سـانتی‌گرید) را نهی نموده و احتمال می‌رود که تعدیل مقدار پولی امین‌های سـپرمیدین و پوترسـین در این فعالیت، دخیل باشـد (۴۱). بر علاوه، تطبیق میلاتونین باعث افزایش سرعت (۲,۵ برابر) جوانه زدن تخم‌های بادرنگ در مقایسه با کنترول تحت حرارت ده درجه سانتی گرید گردیده است (۴۲).

محققان اسـتفاده از میلاتونین را در پروسـه‌ی نگهداری توسـط منجمدسـازی (cryopreservation) مورد مطالعه و بررسـی قرار داده اند. طی این عملیه، کالس (callus) نبات تحت تجربه در معرض درجات بسیار پائین حرارت قرار داده شده و در نتیجه باعث ایجاد تخریبات شدید در آن می‌گردد. اما در صـورتی که کالس نبات مورد نظر قبل از عملیه انجماد با میلاتونین معامله گردد، چانس تخریبات ایجاد شده ناشی از درجات بسیار پائین حرارت استفاده شده در جریان عملیه‌ی مذکور، به حـداقل آن تقلیل می‌یابد. چـنان‌چه نتایج به نشر رسـیده‌ی تحـقیق Uchendu و همـکارانش نشان می‌دهد که در اثر تطـبیق میـلاتونین قـبل از عملـیه‌ی انجماد، سـرعت تخـریب کالـس .Ulmus americana L به حداقل آن رسـیده اسـت (۴۳). در تحقیق دیگری‌که بالای جوانه‌های از قبل معروض شـده نبات گندم با میلاتونین صـورت گرفته اسـت، فعالیت انزایم‌های انتی اکسـیدانت و سـویه‌ی آسـمو- پروتکتانت‌ها افزایش را نشـان داده اند (۳۴). این یافته‌ها بیان‌گر نقش میلاتونین در بهبود مقاومت نباتات در برابر سردی باالاثر خنثی نمودن رادیکال‌های آزاد آکسـیجن و تنظیم موازنه ریدوکس می‌باشـد. برعلاوه میلاتونین با بهبود فعالیت سـیسـتم نوری II و تغییر غلظت میتابولیت‌های مختلف در نبات Cynodon dactylon، مقاومت آن‌را در برابر سرما افزایش می‌دهد (۴۴).

علاوه بر سرما، میلاتونین به عنوان یک کاندید هورمون باالقوه، توانایی محافظت نباتات را در برابر درجات بلند حرارت نیز دارا می‌باشـد. مواجه شـدن نباتات با درجات بلند حرارت باعث افزایش سویه‌ی میلاتونین در حجرات نباتی گردیده و تطبیق آن باعث بلند رفتن فیصدی جوانه زدن تخم‌های نباتات Phacelia tanacetifolia و Arabidopsis thaliana می‌گردد (۴۵).

کاربرد میلاتونین جهت افزایش مقاومت نباتات در برابر نمک مورد مطالعه قرار گرفته است. طوری‌که بر اسـاس نتایج یک تحقیق، تطبیق میلاتونین (۰,۱ مایکرو مولار) در Malus hupehensis باعث بهبود نمو و ظرفیت فوتوسـنتیز آن گردیده اسـت (۴۶). برعلاوه، میلاتونین به‌طور قابل ملاحظه از تجمع هایدروجن پراکسـاید جلوگیری نموده و فعالیت انزایم های ریدوکس از قبیل اسـکوربیت پراکسیدیز، کتلاز و پراکسیدیز را افزایش می‌دهد (۴۷). این یافته‌ها بیان‌گر نقش میلاتونین در کاهش استرس ایجاد شده تو سط نمک در نباتات می‌با شد. در نبات بادرنگ پرورش داده شده در محیط

حاوی غلظت بلند نمک، تعداد ریشههای جانبی در نباتات معامله شده با میلاتونین در مقایسه با کنترول بیشتر بوده است (۴۸، ۴۹). بر علاوه، مطالعات انجام شده نقش میلاتونین را در تنظیم بیان جینهای مسئول بیوسنتیز و کتابولیزم جبریلیک اسید و ابسسیک اسید، هورمونهای کلیدی در بهبود تحمل نمک در نباتات و در نتیجه افزایش مقاومت نبات بادرنگ در برابر نمک، را نشان میدهد (۵۰).

در مطالعهی دیگر اهمیت میلاتونین به عنوان انتی اکسیدانت در نبات بادنجان رومی پرورش یافته تحت غلظت بلند نمک و استرس حرارتی، مورد بررسی قرار گرفته است. در نتیجهی این تحقیقات دریافت گردید که ترانسکرپتوم جینهای دخیل در فعالیت انتی اکسیدانت و انزایمهای مربوطهی آن از قبیل اسکوربیت پراکسیدیز، گلوتاتیون ریدکتاز، گلوتاتیون پراکسیدیز و فاسفولیپیدهایدروپراکساید گلوتاتیون پراکسیدیز، در نباتات معامله شده با میلاتونین متفاوت بوده است (۵۱). این خود بیانگر مؤثریت میلاتونین در بهبود فعالیت پارامترهای فوتوسنتیز و سیستم نوری میباشد.

نقش میلاتونین در بهبود تحمل نباتات در برابر استرس ایجاد شده توسط آب، بیآبی و سیلاب، بررسی گردیده است. بر اساس نتایج مطالعات اخیر، تطبیق میلاتونین (۱۰۰ مایکرو مولار) در سیب باعث رفع آسیب اکسیداتیف، بهبود کارایی فوتوسنتیز و تأخیر پیری نبات ناشی از بیآبی محیط، میگردد (۵۲). علاوه براین، میلاتونین باعث بهبود تحمل نباتات M. prunifolia (مقاوم در برابر کمآبی) و M. hypehensis (حساس در برابر کمآبی) در برابر کمبود آب گردیده است (۵۳). مطالعات انجام شده نشان میدهد که کاهش سویهی بیان جین مسئول سنتیز ابسسیک اسید (MdNCED3)، تقلیل سویهی ابسسیک اسید و افزایش سویهی بیان جینهای دخیل در کتابولیزم آن (MdCYP707A1 و MdCYP707A2) ممکن مسئول این عمل باشد (۵۴).

فعالیت میلاتونین جهت خنثی نمودن رادیکالهای آزاد نیز در بهبود تحمل نباتات در مقابل کمبود آب ارزنده تلقی میگردد. افزایش بیان جین مسئول سنتیز میلاتونین (MzASMT1) در Arabidopsis thaliana ترانس جنیک تحت شرایط بیآب گزارش گردیده است (۵۵).

بر اساس نتایج یک تجربهی دیگر، تطبیق میلاتونین باعث بهبود تخریبات ایجاد شده توسط کمبود آب از قبیل نقص سیستم داخلی کلوروپلاست، سیستم نوری و فعالیت انزایمهای انتی اکسیدانت در انگور میگردد (۵۶). بر اساس گزارش Shi و همکارانش، فعالیت جین های دخیل در میتابولیزم نایتروجن، کاربوهایدریتهای عمده، تغییر شکل اسیدهای ترای کاربوکسلیک، انتقال هورمونها، آیون ها و تعاملات ریدوکس بعد از تطبیق میلاتونین افزایش می یابد (۵۷). به همین ترتیب، بیان

جین‌های دخیل در تولید میتابولیت‌های ثانوی در کولتیورهای Bermuda grass قبلاً معامله شـده با میلاتونین افزایش یافته اسـت (۵۸، ۵۹). این نتایج بیان‌گر نقش مثبت میلاتونین در بهبود مقاومت نباتات در برابر تعداد کثیری از عوامل استرس‌زای غیر زنده من‌جمله کم‌بود آب است.

موجودیت مقدار زیاد آب نیز می‌تواند به حیث یک عامل باالقوه‌ی ا سترس برای نباتات عمل نماید. تحقیقات انجام شـده مؤثریت میلاتونین را در افزایش مقاومت نباتات در برابر عامل اسـترس آب ثابت ساخته اند. چنانچه نتایج یک تحقیق که به منظور شنا سایی اهمیت تطبیق میلاتونین در جریان جوانه زدن تخم و تولید ریشه و اثبات مؤثریت آن بالای سویه‌ی رادیکال‌های آزاد، فعالیت انزام‌های انتی اکسیدانت و فوتوسنتیز در بادرنگ پرورش داده شده در موجودیت عامل استرس آب صوررت گرفته اسـت، نشـان می‌دهد که میلاتونین (۱۰۰ مایکرو مولار) باعث کاهش جلوگیری از جوانه زدن ایجاد شـده توسـط پولی ایتلین گلایکول، تحریک تولید ریشـه و مدت زنده ماندن نبات، افزایش نسبت ریشه بر ساقه و باالاخره تقویت انکشاف ریشه در آن می‌گردد (۶۰). در ضمن تشدید تولید ریشـه، نهال‌ها یا جوانه‌های معامله‌شـده با میلاتونین، کاهش در میزان تخریب کلوروفیل، افزایش در سویه‌ی ترکیبات انتی‌اکسیدانت و فعالیت انزایم‌های خنثی‌کننده‌ی رادیکال‌های آزاد و میزان بالاتر فوتوسنتیز را از خود نشان داده و ساختمان کلوروپلاست در برگ‌های نبات متأثر شده حفظ می‌گردد (۳۰).

فلزات ثقیله عامل اسـترس مهم دیگری اسـت که رشـد و انکشـاف نباتات را متأثر می‌سـازد (۶۱). بر اساس گزارش‌های ثبت شده، میلاتونین تحمل نباتات را در مقابل استرس ایجاد شده ناشی از فلزات ثقیله افزایش می‌د هد. در یک تجر به‌ی انجام شـده بالای نبات نخود، تطبیق میلاتونین با عث زنده‌ماندن نباتات در مقابل تخریبات ایجاد شـده ناشـی از فلز ثقیله‌ی مس (۱۰۰ مایکرو مولار) گـردیده است. این در حالیسـت، که نباتات گروپ کـنترل (بدون معـامله با میلاتونین) باالاثر استرس از بین رفتند (۶۲).

بر اسـاس نتایج تحقیق Posmyk و همکارانش میلاتونین به غلظت‌های پایین (۱- ۱۰ مایکرو مولار) جوانه زنی تخم و نموی جوانه‌های پرورش داده شـده در موجودیت عامل اسـترس مس را بهبود بخشـیده و این تأثیر با غلظت میلاتونین رابطه‌ی معکوس دارد (۶۳). چنان چه غلظت های بلند میلاتونین (۱۰۰ مایکرو مولار) از یک‌طرف بالای عملیه‌ی جوانه زدن و نموی جوانه‌ها تأثیر منفی داشته و از طرف دیگر تأثیر سمی مس را افزایش می‌دهد (۶۳).

در تحقیق دیگر، اهمیت میلاتونین در بهبود تحمل الجی در برابر استرس ناشی از Cadmium (Cd) نشـان داده شـده اسـت (۶۴). بر اسـاس یافته‌های این تجربه، فلزات ثقیله تولید میلاتونین را در نزد

الجی ها تحریک می نمایند (۶۴). نتایج مطالعهی که بالای .Solanum lycopersicum L انجام گردید، نشان داده است که میلاتونین تحمل نبات را در برابر فلز ثقیله Cd از طریق عامل ترانسکرپشن HsfA1a (Heat-shock factor A1a) بهبود میبخشد (۶۵). عامل ترانسکرپشن متذکرهی بیو سنتیز میلاتونین را در موجودیت استرس ناشی از Cd ، افزایش میدهد. بر علاوه، در تجربهی دیگریکه بالای بادنجان رومی پرورش داده شده در موجودیت عامل استرسزای Cd اجرا شد واضح گردید که سویهی میلاتونین تولید شده بهصورت داخلی در نبات با گذشت زمان افزایش مییابد، اما این مقدار نمیتواند تا از تأثیرات مخرب Cd بروی نبات جلوگیری نماید. این در حالیست که تطبیق میلاتونین بهصورت خارجی باعث بهبود کارایی فوتوسنتیز، فعالیت سیستم انتی اکسیدانت (بالاخص انزایم $H^+$ ATPase و گلوتاتیون) و بیوسنتیز فایتوشیلاتینها در نبات گردیده و تحمل آنرا در مقابل عامل استرسزای Cd افزایش میدهد (۶۶).

بر اساس نتایج تحقیق انجام شده بالای گندم، میلاتونین سمیت ایجاد شده ناشی از عامل استرسزای Cd را در جوانههای نبات کاهش میدهد. فلز ثقیله Cd بیان جینهای مسئول بیوسنتیز میلاتونین را در گندم تحریک نموده و باعث افزایش سویهی میلاتونین در نبات میگردد (۶۷). افزایش تولید میلاتونین بهصورت داخلی و تطبیق آن بهگونهی عامل تداوی، باعث ازدیاد ارتفاع/ قد نبات، تحریک نموی ریشه و بهبود تحمل آن در مقابل فلز ثقیله Cd میگردد. این فعالیت میلاتونین از طریق بهبود کارایی سیستم انتی اکسیدانت نبات منجمله فعالیت انزایمهای اسکوربات پراکسیدیز، سوپراکساید دیسموتاز و گلوتاتیون و افزایش ظرفیت جوانهها جهت خنثی نمودن هایدروجن پراکساید و حفظ هوموستاز رادیکالهای آزاد تولیدشده در پروسههای میتابولیک، اجرا میگردد (۶۷).

در مطالعهی دیگریکه بالای .Brassica napus L اجرا شده است، واضح گردید که فلزات ثقیله Cd و Al (Aluminium) باعث کاهش نمو و فعالیت انزایمهای انتی اکسیدانت نبات گردیده و تولید هایدروجن پراکساید و Malondialdehyde را در جوانهها افزایش میدهد (۶۸). تطبیق میلاتونین بیان جینهای دخیل در بیوسنتیز میلاتونین نباتی (BnCOMT) را تحریک نموده و باعث افزایش فعالیت انزایمهای انتی اکسیدانت، تولید پرولین، کلوروفیل و انتوسیانینها میگردد. در نتیجه این تأثیرات، کارایی عملیه فوتوسنتیز، سرعت جوانهزنی، نموی ریشه و ساقهی نبات افزایش یافته و تحمل آن در مقابل عوامل استرسزای Cd و Al بهبود مییابد (۶۸).

میلاتونین علاوه بر این‌که تأثیرات سوء ناشی از ازدیاد سویه‌ی فلزات ثقیله را در نباتات تقلیل می‌دهد، می‌تواند اختلالات میتابولیک ایجاد شده باالاثر کم‌بود عناصر مهم را نیز در آن‌ها تسهیل ببخشد. در حال حاضر شواهدی مبتنی بر اثبات نقش میلاتونین در بلند بردن تحمل نباتات در برابر کم‌بود آهن وجود دارد (۶۹). احتمال می‌رود که این فعالیت میلاتونین با استفاده از یک پروسه‌ی وابسته به تولید نایتریک اکساید در موجودیت عامل محرک پولی امین‌ها تحت شرایط کم‌بود آهن اجرا گردد. در تجربه‌ی اجرا شده روی Arabidopsis thaliana پروش یافته تحت شرایط کم‌بود آهن، بیوسنتیز میلاتونین در نبات تحریک گردیده است.

تطبیق میلاتونین بهصورت خارجی باعث افزایش سویه‌ی آهن منحل در سیستم ریشه و ساقه گردیده و هم‌چنان کلوروزس ایجاد شده ناشی از کم‌بود آهن را با کاهش سویه‌ی آهن متصل به پکتین و هیمی سلولوز موجود در دیوار حجروی ریشه‌ی نبات، تخفیف می‌دهد (۶۹). بر علاوه، میلاتونین بیان جین‌های مسئول جذب آهن از قبیل FIT1, FRO2 و IRT1 را افزایش داده و در مجموع مقاومت نبات را در برابر کم‌بود آهن بهبود می‌بخشد (۶۹).

اهمیت میلاتونین به عنوان یک کاندید جهت افزایش مقاومت نباتات در برابر امراض مختلف به‌طور وسیع مورد بحث قرار گرفته است. براساس گزارش Yin و همکارانش، مقاومت نبات Malus prunifolia در برابر Diplocarpon mali که باعث ایجاد نوع مشخص لکه (Marssonina apple blotch) در سیب می‌گردد، بعد از تطبیق میلاتونین افزایش یافته است. علاوه براین، مؤثریت سیستم نوری، ظرفیت خنثی نمودن رادیکال‌های آزاد و فعالیت انزایم‌های دفاعی نبات بعد از معامله با میلاتونین به‌طور قابل ملاحظه افزایش می‌یابند (۷۰).

بر اساس نتایج یک تحقیق دیگری‌که توسط Lee و همکارانش صورت گرفته است، واضح گردید که میلاتونین مقاومت نبات Arabidopsis thaliana را در برابر سوش DC3000 باکتری مرضی Pseudomonas syringae افزایش می‌دهد (۷۱). عامل مرضی نام‌برده به‌طور قابل ملاحظه سویه‌ی میلاتونین و نایتریک اکساید را بلند برده، در حالی‌که سیستم معافیت ذاتی قادر به تأمین مصوونیت نباتات جهش یافته بدون نایتریک اکساید در مقابل سوش مذکور نمی‌باشد (۵۷). با در نظرداشت این یافته‌ها، می‌توان گفت که میلاتونین به گونه‌ی یک کاندید اقتصادی از نباتات در مقابل انتانات مرضی محافظت نموده و این فعالیت آن از طریق میکانیزم وابسته به نایتریک اکساید صورت می‌گیرد. هم‌چنان Shi و همکارانش گزارش نموده اند که میلاتونین مقاومت کیله را در مقابل Fusarium با استفاده از تنظیم بیان جین‌های MaHSP90s بهبود می‌بخشد (۵۷).

اهمیت میلاتونین در تغییر ترکیبات کیمیاوی نباتات نیز مورد بحث و تحقیق قرار گرفته است. بر اساس گزارش Sarrou و همکارانش غلظت‌های مختلف میلاتونین می‌تواند تولید تیل مفر، مرکبات فینولیک و فلاونوییدها را در برگ‌های نارنج متأثر بسازد (۷۲). بر اساس نتایج این تحقیق، میلاتونین علاوه بر افزایش مقدار مواد فینولیک و فلاونوییدها در برگ نبات، باعث تقویت تأثیرانتی اکسیدانت (تجارب DPPH و FRAP) خلاصه میتانولیک برگ‌های نبات نیز گردیده است (۷۲).

**نتیجه‌گیری**

در گذشته میلاتونین به عنوان یک اندول امین بایوجنیک منحصر به عالم حیوانات در نظر گرفته می‌شد. اما با ظهور تکنیک‌های مدرن و بررسی فایلوجنتیک، به قدامت و فراگیر بودن آن در اکثریت موجودات زنده پی برده شد. چنانچه در حال حاضر این مالیکول را به گونه‌ی یک هورمون نباتی معرفی نموده و فعالیت‌های فزیولوژیک متعدد را به آن مرتبط می‌دانند. با آن‌که اثبات تعداد زیادی فعالیت‌های فزیولوژیک پیشنهاد شده برای میلاتونین نیازمند شواهد و تحقیقات بیشتر است، اما با آن‌هم، این مالیکول می‌تواند به عنوان یک هورمون نباتی مؤثر جهت تحریک نمو و انکشاف نباتات، حفظ و بهبود مقاومت نباتات در برابر شرایط ناسازگار محیطی، به گونه‌ی انتی‌اکسیدانت و ثبات‌دهنده‌ی تعادل ریدوکس حجرات نباتی تلقی گردد.

## منابع


(1) A. Brzezinski, “Melatonin in Humans,” New England Journal of Medicine, 1997; no 3, 336, pp. 186-95.

(2) A. B. Lerner, J. D. Case, Y. Takahashi, T. H. Lee and W. Mori, "ISOLATI OF MELATONIN, THE PINEAL GLAND FACTOR THAT LIGHTI MELANOCYTES," J. Am. Chem. Soc, 1958; vol. 80, no. 10, p. 2587.

(3) G. d. Amaral and J. Cipolla-Neto, "A brief review about melatonin, a pir mone," Arch Endocrinol Metab, 2018; vol. 62, no. 4, pp. 472-9.

(4) S. R. Pandi-Perumal, V. Srinivasan, G. J. M. Maestroni, D. P. Cardinali, B. Poeggeler and R. Hardeland, "Melatonin," FEBS Journal, 2006; vol. 273, pp. 2813–2838.

(5) S. Bachurin, "Medicinal chemistry approaches for focused search of agents for Alzheimer's disease treatment and prevention," Medicinal Research Reviews, 2001; vol. 23, no. 1, pp. 195- 7.

(6) M. Karasek and K. Winczyk, "MELATONIN IN HUMANS," JOURNAL OF PHYSIOLOGY AND PHARMACOLOGY, 2006; vol. 57, pp. 19- 39.

(7) Reiter, R. Hardeland, C. Lucien, M. Sergio, D. Paredes, A. Korkmaz, M. Rosa, S. J. C. Mayo, L. Fuentes-Broto and J. Russel, "The changing biological roles of melatonin during evolution: from an antioxidant to signals of darkness, sexual selection and fitness," Biological Reviews, 2010; vol. 85, no. 3.

(8) D.-X. Tan, R. Hardeland, L. C. Manchester, S. D. Paredes, A. Korkmaz, R. M. Sainz, J. C. Mayo, L. Fuentes-Broto and R. J. Reiter, "The changing biological roles of melatonin during evolution: from an antioxidant to signals of darkness, sexual selection and fitness," Biol Rev Camb Philos Soc, 2010; vol. 85, no. 3, pp. 607-23.

(9) A. Coto-Montes and R. Hardeland, "Antioxidative effects of melatonin in Drosophila melanogaster: Antagonization of damage induced by the inhibition of catalase," Journal of Pineal Research, 1999; vol. 27, no. 3, pp. 154- 8.

(10) R. J. Reiter, D. X. Tan, S. Burkhardt and L. C. Manchester, "Melatonin in Plants," Nutrition Review, 2001; vol. 59, no. 9, pp. 286-290.

(11) M. B. Arnao and J. Hernandez-Ruiz, "Melatonin: A new plant hormone and/or a plant master regulator?," Trends in Plant Science, 2018; vol. 24, no. 1, pp. 38-48,.

(12) M. M. Posmyk and K. M. Janas, "Melatonin in plants," Acta Physiol Plant, 2009; vol. 31, pp. 1-11.

(13) M. B. Arnao and J. Hernández-Ruiz, "The Physiological Function of Melatonin in Plants," Plant Signaling & Behavior, 2006; vol. 1, no. 3, pp. 89-95.

(14) R. Hardeland, "Melatonin in plants and other phototrophs: advances and gaps concerning the diversity of functions," Journal of Experimental Botany, 2015; vol. 66, no. 3, pp. 627– 46.

(15) M. Arnao and J. Hernández-Ruiz, "Melatonin: plant growth regulator and/or biostimulator during stress?," Trends in Plant Science, 2014; vol. 19, no. 12, pp. 789- 97.

(16) R. Caniato, R. Filippini, A. Piovan, L. Puricelli, A. Borsarini and E. M. Cappelletti, "Melatonin in Plants," in Advances in Experimental Medicine and Biology, 2003; vol. 527, pp. 593-7.

(17) D.-. X. Tan, R. Hardeland, L. C. Manchester, A. Korkmaz, S. Ma, S. Rosales-Corral and R. J. Reiter, "Functional role of melatonin in plants, and perspectives in nutritional and agriultural science," Journal of Experimental Botany, 2012; vol. 63, no. 2, pp. 577-597,.

(18) R. Hardeland, "Melatonin in Plants–Diversity of Levels and Multiplicity of Functions," Frontiers in Plant Science, 2016 vol. 7, p. 918.

(19) B. Salehi, F. Sharopov, P. V. T. Fokou, A. L. d. J. Kobylinska, K. Tadio, J. Sharifi-Rad, M. M. M. M. Posmyk, N. Martins and M. Iriti, "Melatonin in Medicinal and Food Plants: Occurrence, Bioavailability, and Health Potential for Humans," Cells, 2019; vol. 8, p. 681.

(20) S. Murch, C. Simmons and P. Saxena, "Melatonin in feverfew and other medicinal plants," Tha Lancet, 1997; vol. 350, no. 9091, pp. 1598- 99.

(21) G. Chena, Y. Huob, D.-X. Tanc, Z. Lianga, W. Zhanga and Y. Zhang, "Melatonin in Chinese medicinal herbs," Life Sciences, 2003; vol. 73, no. 1, pp. 19-26.

(22) A. P. Simopoulos, D. Tan, L. C. Manchester and R. J. Reiter, "Purslane: a plant source of omega-3 fatty acids and melatonin," Journal of Pineal Research, 2005; vol. 39, pp. 331- 2,.

(23) F. A. Badria, "Melatonin, serotonin, and tryptamine in some Egyptian food and medicinal plants," Journal of Medicinal Food, 2002; vol. 5, no. 3, pp. 153- 7.

(24) D. Tan, L. Manchester, E. Esteban-Zubero, Z. Zhou and R. Reiter, "Melatonin as a Potent and Inducible Endogenous Antioxidant: Synthesis and Metabolism," Molecules, 2015; vol. 20, no. 10, pp. 18886- 906,.

(25) N. S. Omar SH, "Melatonin, Receptors, Mechanism, and Uses," Systematic Reviews in Pharmacy, 2010; vol. 1, no. 2, pp. 158-71.

(26) D.-X. Tan, "Melatonin and plants," Journal of Experimental Botany, 2015; vol. 66, no. 3, pp. 625-26.

(27) M. Nawaz, Y. Huang, Z. Bie, W. Ahmed, R. J. Reiter, M. Niu and S. Hameed, "Melatonin: Current Status and Future Perspectives in Plant Science," Front. Plant Sci, 2015; vol. 6, p. 1230.

(28) Q. Tan, "A label-free differential proteomics analysis reveals the effect of melatonin on promoting fruit ripening and anthocyanin accumulation upon postharvest in tomato," Journal of Pineal Research, 2016; vol. 61, no. 2.

(29) M. Arnao, "Phytomelatonin: Discovery, Content and role in Plants," Advances in Botany, 2014; vol. 2, p. e815769.

(30) N. Zhang, B. Zhao, H. J. Zhang, S. Weeda, C. Yang, Z. C. Yang and …. Y. D. Guo, "Melatonin promotes water-stress tolerance, lateral root formation, and seed germination in cucumber (Cucumis sativusL.)," Journal of Pineal Research, 2012; vol. 54, no. 1, pp. 15- 23.

(31) M. Arnao and J. H.-. Ruiz, "Melatonin and its relationship to plant hormones," Annals of Botany, 2018; vol. 121, no. 2, pp. 195- 207.

(32) J. Hernández-Ruiz and M. Arnao, "Melatonin stimulates the expansion of etiolated lupin cotyledons," Plant Growth Regulation, 2008; vol. 55, no. 1, pp. 29- 34,.

(33) V. Bajwa, M. Shukla, S. Sherif, S. Murch and P. Saxena, "Role of melatonin in alleviating cold stress inArabidopsis thaliana.," Journal of Pineal Research, 2014; vol. 56, no. 3, pp. 238- 45.

(34) J. Fan, Y. Xie, Z. Zhang and L. Chen, "Melatonin: A Multifunctional Factor in Plants," International journal of Molecular Sciences, 2018; vol. 19, no. 5, p. 1528.

(35) J. Kolar, C. Johnson and I. Machackova, "Exogenously applied melatonin (N-acetyl-5-methoxytryptamine) affects flowering of the short-day plant Chenopodium rubrum.," Physiologia Plantarum, 2003; vol. 118, no. 4, pp. 605- 12,.

(36) M. B. Arnao and J. Hernández-Ruiz, "Protective effect of melatonin against chlorophyll degradation during the senescence of barley leaves," Journal of Pineal Research, 2008; vol. 46, no. 1, pp. 58- 63.

(37) P. Wang, L. Yin, D. Liang, C. Li, F. Ma and Z. Yue, "delayed senescence of apple leaves by exogenous melatonin treatment: toward regulating the ascorbate-glutathione cycle," Journal of Pineal Research, 2012; vol. 53, no. 1, pp. 11-20.

(38) Z. Yin, J. Lu, S. Meng, Y. Liu, I. Mostafa, M. Qi and T. Li, "Exogenous melatonin improves salt tolerance in tomato by regulating photosynthetic electron flux and the ascorbate–glutathione cycle," Journal of Plant Interactions, 2019; pp. 453-63.

(39) Q. Sun, N. Zhang, J. Wang, Y. Cao, X. Li, H. Zhang, L. Zhang, D.-X. Tan and Y.-D. Guo, "A label-free differential proteomics analysis reveals the effect of melatonin on promoting fruit ripening and anthocyanin accumulation upon postharvest in tomato," Journal of Pineal Research, 2016; vol. 61, no. 2, pp. 138-53.

(40) B. Debnath, W. Islam, M. Li, Y. Su, X. Lu, S. Mitr, M. Hussain, S. Liu and D. Qiu, "Melatonin Mediates Enhancement of Stress Tolerance in Plants," Int J Mol Sci, 2019; vol. 20, no. 5, p. 1040.

(41) X.-Y. Lei, R.-Y. Zhu, G.-Y. Zhang and Y.-R. Dai, "Attenuation of cold-induced apoptosis by exogenous melatonin in carrot suspension cells: the possible involvement of polyamines," Jounal of Pineal Research, 2004; vol. 36, no. 2, pp. 126-31.

(42) M. Posmyk, M. Bałabusta, M. Wieczorek, E. Sliwinska and K. Janas, "Melatonin applied to cucumber (Cucumis sativusL.) seeds improves germination during chilling stress," Journal of Pineal Research, 2009; vol. 46, no. 2, pp. 214- 23.

(43) E. E. Uchendu, M. R. Shukla, B. M. Reed and P. K. Saxena, "Melatonin enhances the recovery of cryopreserved shoot tips of American elm (Ulmus americanaL.)," Journal of Pineal Research, 2013.

(44) J. Fan, Z. Hu, Y. Xie, Z. Chan, K. Chen, E. Amombo, L. Chen and J. Fu, "Alleviation of cold damage to photosystem II and metabolisms by melatonin in Bermudagrass," Front. Plant Sci, 2015; vol. 6, p. 925.

(45) I. Tiryaki and H. Keles, "Reversal of the inhibitory effect of light and high temperature on germination of Phacelia tanacetifolia seeds by melatonin," Journal of Pineal Research, 2012; vol. 52, no. 3, pp. 332- 9.

(46) C. Li, P. Wang, Z. We, D. L. C. Liu, L. Yin, D. Jia, M. Fu and F. Ma, "The mitigation effects of exogenous melatonin on salinity-induced stress in Malus hupehensis," Journal of Pineal Research, 2012; vol. 53, no. 3, pp. 298-306.

(47) W. Gao, Z. Feng, Q. Bai, J. He and Y. Wang, "Melatonin-Mediated Regulation of Growth and Antioxidant Capacity in Salt-Tolerant Naked Oat under Salt Stress," Int J Mol Sci, 2019; vol. 20, no. 5, p. 1176.

(48) J. Li, J. Liu, T. Zhu, C. Zhao, L. Li and M. Chen, "The Role of Melatonin in Salt Stress Responses," Int J Mol Sci., 2019; vol. 20, no. 7, p. 1735.

49) N. Zhang, H. Zhang, B. Zhao, Q. Sun, Yun-Yun, C. R. Li, X. Wu, S. Weeda, L. Li, S. Ren, R. J. Reiter and Y. Guo, "The RNA-seq approach to discriminate gene expression profiles in response to melatonin on cucumber lateral root formation," Journal of PinealResearch, 2013; vol. 56, no. 1, pp. 39-50.

(50) H. Zhang, N. Zhang, R. Yang, L. Wang, Q. Sun, D. Li and …. Y. Guo, "Melatonin promotes seed germination under high salinity by regulating antioxidant systems, ABA and GA4interaction in cucumber (Cucumis sativusL.)," 2014; vol. 57, no. 3, pp. 269- 279.

(51) V. Martinez, M. Nieves-Cordones, M. Lopez-Delacalle, R. Rodenas, T. Mestre, F. Garcia-Sanchez and R. Rivero, "Tolerance to Stress Combination in Tomato Plants: New Insights in the Protective Role of Melatonin," Molecules, 2018; vol. 23, no. 3, p. 535.

(52) P. Wang, X. Sun, Z. Wei, C. Li, D. Liang and F. Ma, "Long-term exogenous application of melatonin delays drought-induced leaf senescence in apple," Journal of Pineal Research, 2012; vol. 54, no. 3, pp. 292- 302.

(53) A. Sharma and B. Zheng, "Melatonin Mediated Regulation of Drought Stress: Physiological and Molecular Aspects," Plants (Basel), 2019; vol. 8, no. 7, p. 190.

(54) C. Li, D.-X. Tan, D. Liang, C. Chang, D. Jia and F. Ma, "Melatonin mediates the regulation of ABA metabolism, free-radical scavenging, and stomatal behaviour in two Malus species under drought stress," Journal of Experimental Botany, 2015; vol. 66, no. 3, p. 669–80.

(55) B. Zuo, X. Zheng, P. He, L. Wang, Q. Lei, C. Feng and …. J. Kong, "Overexpression ofMzASMTimproves melatonin production and enhances drought tolerance in transgenicArabidopsis thalianaplants," Journal of Pineal Research, 2014; vol. 57, no. 4, pp. 408- 17.

(56) J.-F. Meng, T.-F. Xu, Z.-Z. Wang, Z.-M. X. Yu-Lin Fang and Z.-W. Zhang, "The ameliorative effects of exogenous melatonin on grape cuttings under water-deficient stress: antioxidant metabolites, leaf anatomy, and chloroplast morphology," Journal of Pineal Research, 2014; vol. 57, no. 2, pp. 200- 12.

(57) H. Shi, Y. Chen, D. Tan, R. Reiter, Z. Chan and C. He, "Melatonin induces nitric oxide and the potential mechanisms relate to innate immunity against bacterial pathogen infection inArabidopsis.," Journal of Pineal Research, 2015; vol. 59, no. 1, pp. 102- 8.

(58) Z. Chan and H. Shi, "Improved abiotic stress tolerance of bermudagrass by exogenous small molecules," Plant Signal Behav, 2015; vol. 10, no. 3, p. e991577.

(59) L. Chen, J. Fan, Z. Hu, X. Huang, E. Amombo, A. Liu, A. Bi, K. Chen4, Y. Xie and J. Fu, "Melatonin Is Involved in Regulation of Bermudagrass Growth and Development and Response to Low K+ Stress," Front. Plant Sci, 2017; vol. 8, p. 2038.

(60) N. Zhang, B. Zhao, H.-J. Zhang, S. Weeda, C. Yang, Z.-C. Yang, S. Ren and Y.-D. Guo, "Melatonin promotes water-stress tolerance, lateral root formation, and seed germination in cucumber (Cucumis sativus L.)," Journal of Pineal Research, 2013; vol. 54, no. 1, pp. 15- 23.

(61) D. Goyal, A. Yadav, M. Prasad, T. B. Singh, P. Shrivastav, A. Ali, P. K. Dantu and S. Mishra, "Effect of Heavy Metals on Plant Growth: An Overview," in Contaminants in Agriculture, 2020, pp. 79- 101.

(62) D. Tan, L. Manchester, P. Helton and R. Reiter, "Phytoremediative Capacity of Plants Enriched with Melatonin," Plant Signaling & Behavior, 2007; vol. 2, no. 6, pp. 514- 16.

(63) M. M. Posmyk, H. Kuran, K. Marciniak and K. M. Janas, "Presowing seed treatment with melatonin protects red cabbage seedlings against toxic copper ion concentrations.," Journal of Pineal Research, 2008; vol. 45, no. 1, pp. 24-31.

(64) O. Tal, A. Haim, O. Harel and Y. Gerchman, "Melatonin as an antioxidant and its semi-lunar rhythm in green macroalga Ulva sp.," Journal of Experimental Botany, 2011; vol. 62, no. 6, p. 1903–10.

(65) S.-Y. Cai, Y. Zhang, Y.-P. Xu, Z.-Y. Qi, M.-Q. Li, G. J. Ahammed, X.-J. Xia, K. Shi, Y.-H. Zhou, R. J. Reiter, J.-Q. Yu and J. Zhou, "HsfA1a upregulates melatonin biosynthesis to confer cadmium tolerance in tomato plants," Journal of Pineal Research, 2017; vol. 62, no. 2.

(66) M. K. Hasan, G. J. Ahammed, L. Yin, K. Shi, X. Xia, Y. Zhou, J. Yu and J. Zhou, "Melatonin mitigates cadmium phototoxicity through modulation of phytochelatins biosynthesis, vacuolar sequestration, and antioxidant potential in Solanum lycopersicum L.," Front. Plant Sci., 2015; vol. 6, p. 601.

(67) J. Ni, Q. Wang, F. A. Shah, W. Liu, D. Wang, S. Huang, S. Fu and L. Wu, "Exogenous melatonin conferes cadmium tolerance by counterbalancing the hydrogen peroxide homeostasis in wheat seedlings," Molecules, 2018; vol. 23, no. 4, p. 799,.

(68) A. Sami, F. Shah, M. Abdullah, X. Zhou, Y. Yan, Z. Zhu and K. Zhou, "Melatonin mitigates cadmium and aluminium toxicity through modulation of antioxidant potential in Brassica napus L.," Plant Biology, 2020; vol. 22, no. 4.

(69) C. Zhou, Z. Liu, L. Zhu, Z. Ma, J. Wang and J. Zhu, "Exogenous Melatonin Improves Plant Iron Deficiency Tolerance via Increased Accumulation of Polyamine-Mediated Nitric Oxide," International Journal of Molecular Sciences, 2016; vol. 17, no. 11, p. 1777.

(70) L. Yin, P. Wang, M. Li, X. Ke, C. Li, D. Liang and …. F. Ma, "Exogenous melatonin improvesMalusresistance to Marssonina apple blotch," . Journal of Pineal Research, 2013; vol. 54, no. 4, pp. 426- 34.

(71) H. Lee, Y. Byeon and K. Back, "Melatonin as a signal molecule triggering defense responses against pathogen attack inArabidopsisand tobacco," Journal of Pineal Research, 2014; vol. 57, no. 3, pp. 262- 68.

(72) E. Sarrou, P. Chatzopoulou, K. D.-. Theriou, I. Therios and A. Koularmani, "Effect of melatonin, salicylic acid and gibberellic acid on leaf essential oil and other secondary metabolites of bitter orange young seedlings," Journal of Essential Oil Research, 2015. vol. 27, no. 6, pp. 487- 96.