

بیوسورفکتانت‌ها: آفت‌کش‌های دوستدار محیط زیست Biosurfactants: Environmentally friendly pesticides

نوشین فضائی^۱، نیما بهادر^{۲*} و شهرام حسامی^۲

دریافت: ۱۴۰۱/۰۹/۱۱

پذیرش: ۱۴۰۱/۱۲/۱۶

چکیده

بیوسورفکتانت‌ها مولکول‌های فعال سطحی دوگانه دوستی هستند که توسط میکروارگانیسم‌هایی مانند باکتری‌ها، قارچ‌ها و مخمرها تولید می‌شوند. امروزه، این ترکیبات به دلیل سمیت کم، تجزیه بیولوژیکی، فعالیت بهینه در شرایط سخت محیطی و ماهیت دوستدار محیط زیست، در مدیریت آفات بسیار مورد توجه قرار گرفته‌اند. اخیراً، فعالیت حشره‌کشی بیوسورفکتانت‌های به‌دست آمده از گونه‌های مختلف باکتریایی گزارش شده است. بنابراین، با توجه به نقش بیوسورفکتانت‌ها در تولید حشره‌کش‌های جدید و مدیریت زیست‌محیطی آفات، در این مقاله به بررسی کاربرد بیوسورفکتانت‌ها در کنترل آفات کشاورزی و فعالیت‌های مستقیم ضد میکروبی این ترکیبات در برابر عوامل بیماری‌زای گیاهی پرداخته شده است. همچنین چگونگی تحریک سیستم ایمنی گیاهان توسط رامنولپیدها و لیپوپپتیدها که منجر به مقاومت گیاه در برابر بیماری‌زاهای گیاهی می‌شود، مورد بررسی قرار گرفته است. به طوری که تحقیقات بیشتر در این زمینه می‌تواند منجر به جایگزینی این آفت‌کش‌های زیستی به جای آفت‌کش‌های مصنوعی شده و در آینده با ارائه طرح‌های تحقیقاتی جدید می‌توان به اثرات بافت‌شناسی آن بر روی آفات و نیز بهینه‌سازی تولید پرداخت.

واژگان کلیدی: بیوسورفکتانت، آفت‌کش زیستی، بیماری گیاهی، رامنولپید، لیپوپپتید

مقدمه

بیماری‌های گیاهی باعث کاهش قابل توجه محصولات کشاورزی، قبل یا پس از برداشت می‌شوند و تهدید کننده جدی تولید مواد غذایی برای جمعیت رو به رشد جهان هستند. تقریباً ۳۰ درصد از کل تولیدات کشاورزی به دلیل بیماری‌های مختلف گیاهی از بین می‌روند (Droby, 2020). کشاورزان اغلب برای مدیریت بیماری‌های گیاهی و بیمارگرها، از آفت‌کش‌های شیمیایی استفاده می‌کنند؛ استفاده نامناسب و مستمر از آفت‌کش‌های شیمیایی در طول فرآیند تولید محصولات زراعی منجر به پیامدهای نامطلوب مختلفی از جمله کاهش کیفیت غذا، آلودگی خاک و آب، مقاومت آفات، تخریب میکروبیوم‌های طبیعی و تهدید بر سلامت مصرف‌کنندگان می‌شود. علاوه بر این، عوامل کنترل زیستی میکروبی مختلف، از جمله باکتری‌ها، قارچ‌ها و مخمرها، اغلب برای مدیریت بیماری‌های گیاهی مورد استفاده قرار گرفته‌اند و پاسخ مؤثری در برابر رشد بیمارگرهای گیاهی، همچنین بهبود کیفیت نگهداری میوه یا افزایش عمر انبارداری نشان دادند. مواد شیمیایی مورد استفاده در کشاورزی به دلیل دسترسی آسان و پاسخ سریع، بیشتر از سایر مواد محافظت کننده از محصولات گیاهی مورد استفاده قرار می‌گیرند. فرمولاسیون‌های سنتی آنها و میزان پراکندگی کم این مواد در محل مورد نظر، در سطح گیاه و بیمارگر، منجر به کاهش کارایی و آلودگی محیطی شده است. بر اساس این گزارش، تخمین زده شده است که تنها حدود ۰/۱ درصد از کل آفت‌کش‌های مورد استفاده به موجودات زنده هدف می‌رسد و قسمت عمده باقی مانده، محیط اطراف را آلوده می‌کند (Mostafalou and Abdollahi, 2013; Gill and Garg, 2014).

بیوسورفکتانت‌ها یکی از جدیدترین بیومولکول‌های سنتز شده میکروبی هستند که در زمینه‌های متعددی از جمله کشاورزی، داروسازی، آرایشی و بهداشتی، فرآوری مواد غذایی و صنایع شوینده‌های محیط، مرطوب کننده‌ها، کف‌سازها

۱ و ۲- به ترتیب مربی و دانشیار، گروه میکروبیولوژی، دانشکده علوم، کشاورزی و فناوری‌های نوین، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد شیراز، شیراز، ایران

۳- دانشیار، گروه حشره شناسی، دانشکده علوم، کشاورزی و فناوری‌های نوین، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد شیراز، شیراز، ایران

نویسنده مسئول مکاتبات: bahador@iaushiraz.ac.ir

و امولسیون‌ها استفاده شده است. امروزه، بیوسورفکتانت‌ها به‌طور گسترده‌ای با تأمین غلظت عناصر کمیاب به منظور بهبود کیفیت خاک مورد استفاده قرار می‌گیرند و یا با آفت‌کش‌ها مخلوط می‌شوند یا به تنهایی روی سطوح گیاه برای کنترل بیماری‌های گیاهی استفاده می‌شوند (Kumar et al., 2021).

Bacillus و *Pseudomonas* رایج‌ترین جنس‌های باکتریایی هستند که برای تولید بیوسورفکتانت استفاده می‌شوند. گزارش‌های متعددی وجود دارد که نشان‌دهنده قدرت آن‌ها در تولید بیوسورفکتانت و تأثیر آن‌ها در مدیریت موفق بیمارگر گیاهی است (Jibrin et al., 2021). بیوسورفکتانت‌های تولید شده توسط *Pseudomonas putida* پس از کاربرد، مانع از رشد بیمارگر *Phytophthora capsici* در خیار از طریق تجزیه زئوسپورها می‌شود (Kruijt et al., 2009). لیپوپپتیدهای حلقوی بیوسورفکتانت تولید شده توسط *Pseudomonas fluorescens* دارای خواص ضدقارچی هستند (Nielsen and Sørensen, 2003). فنازین و لیپوپپتید حلقوی، سویه *Pseudomonas* CMR12a پتانسیل کنترل زیستی مؤثری در برابر پوسیدگی ریشه *Rhizoctonia* روی لوبیا نشان داد (D'aes et al., 2011). لیپوپروتئین‌های بیوسورفکتانت حاصل از *Bacillus* دارای فعالیت آنتاگونیستی قوی علیه *Aspergillus* sp.، *Fusarium* sp. و *Biopolaris sorokiniana* است (Velho et al., 2011).

در مطالعه دیگری مشاهده شد بیوسورفکتانت تولید شده توسط *Bacillus licheniformis* به‌طور قابل توجهی بیمارگر *Rhizoctonia solani*، عامل پوسیدگی ریشه در لوبیا را کنترل می‌کند (Akladios et al., 2019). بیوسورفکتانت‌های تولید شده توسط *Bacillus subtilis* دارای فعالیت‌های نمادکشی زیستی در برابر نماد *Meloidogyne incognita* عامل ایجاد کننده گال ریشه هستند (Hussain et al., 2020). سورفکتانت گلیکولیپیدی حاصل از *Acinetobacter* sp. فعالیت آنتاگونیستی علیه *Xanthomonas oryzae* P.V. Oryzae XAV24 نشان داد (Shalini et al., 2017). سورفاکتین، بیوسورفکتانت تولید شده توسط *Brevibacillus brevis* دارای خواص ضدباکتریایی و ضدقارچی است (Haddad et al., 2008). به‌طور مشابه، سویه *Burkholderia* sp. گلیکولیپید تولید کرد که فعالیت ضدباکتریایی وسیع‌الطیف علیه بیمارگرهای *Pseudomonas aeruginosa*، *E. coli* و *Salmonella paratyphi* نشان داد (Radhakrishnan and Mathew, 2020).

بیوسورفکتانت‌ها در مدیریت بیمارگرها متفاوت عمل می‌کنند. به‌عنوان مثال، بیوسورفکتانت با تأثیر بر روی دیواره سلولی آفات، به دلیل کم آبی، صدمات قابل توجهی ایجاد می‌کند (Edosa et al., 2018). در مطالعه‌ای، مشاهده شد سورفاکتین تولید شده توسط *Bacillus amyloliquefaciens* پس از استفاده، بر روی کوتیکول شته تأثیر گذارد و منجر به دفع آب از غشای کوتیکول و در نتیجه کم آبی بدن و مرگ گردید (Yun et al., 2013). محققین پس از بررسی آسیب‌شناسی بافت بیمار با بیوسورفکتانت، علائم نکروز و تجزیه غشای پایه را در روده میانی لارو *Spodoptera littoralis* مشاهده کردند (Ben Khedher et al., 2017). بیوسورفکتانت‌های گزارش شده و کاربرد آن‌ها در مدیریت بیماری‌های گیاهی جایگزین بسیار خوبی برای آفت‌کش‌های شیمیایی هستند؛ در حال حاضر در نقاط مختلف جهان مورد استفاده قرار می‌گیرند. با این حال، مزیت دیگر استفاده از سورفکتانت میکروبی، افزایش رشد گیاه و تأمین منبع غذایی و شرایط مطلوب برای میکروفلور بومی است که برای گیاهان جهت کاهش تنش‌های مختلف زیستی و غیرزیستی و برای تخریب مواد سمی و آلاینده‌های محیطی خطرناک، لازم و ضروری است. در این مطالعه، پیشرفت‌های اخیر در مورد نقش بیوسورفکتانت‌ها در کنترل آفات گیاهی ارائه می‌گردد.

منابع میکروبی آفت‌کش‌ها

باکتری‌ها، باکتریوفاژها، قارچ‌ها، ویروس‌ها و نماتدها آفت‌کش‌های میکروبی تولید می‌کنند که برای کنترل بیماری‌های مختلف در محصولات غذایی در سراسر جهان استفاده می‌شوند (Yadav et al., 2017). این ترکیبات از طریق پاشش یا خیساندن مورد استفاده قرار می‌گیرند و یا مستقیماً به صورت قرص به ریشه گیاه، پوشش بذر یا تیمار ریشه قبل از کاشت توسط حشرات مختلف اعمال می‌شوند (Montesinos and Bonaterra, 2009). از آنجا که استفاده بیش از حد از

سموم شیمیایی نه تنها ساختار خاک را از بین می‌برد، بلکه باعث آسیب به سلامت خاک نیز می‌شود، آفت‌کش‌های میکروبی یکی از راهکارهای بسیار مهم محسوب می‌شوند (Singh and Yadav, 2020؛ Kumar *et al.*, 2019). امروزه، طیف وسیعی از میکروبیوم‌ها برای مدیریت جمعیت حشرات استفاده می‌شوند. این ارگانسیم‌ها هدفی خاص داشته و مستقیماً از طریق تولید پروتئین‌های کریستالی یا غیرمستقیم با سیدروفور (سیدروفورها تحت شرایط کمبود آهن در خاک به‌عنوان وسیله‌ای برای تأمین آهن ترشح می‌شوند)، از طریق جلوگیری از دسترسی حشرات به مواد معدنی و یون‌ها، آنها را از بین می‌برند (Kumari *et al.*, 2014). آفت‌کش‌های زیستی حاصل از باکتری‌ها، قارچ‌ها، ویروس‌ها و نامتدها به‌طور مستقیم ترکیباتی را به‌عنوان عامل اصلی کنترل آفات تولید می‌کنند (Koul, 2011). اخیراً گزارش شده است که گونه‌های مختلف باکتریایی و قارچی توانایی تولید بیوسورفکتانت را داشته (Edosa *et al.*, 2018) که کاربردهای شناخته شده‌ای در صنایع غذایی و تصفیه بیولوژیکی آلاینده‌های سمی دارند، همچنین در صنعت آفت‌کش‌ها و کنترل آفات و بیماری‌های گیاهی بسیار مورد توجه قرار گرفته‌اند.

بیوسورفکتانت‌ها

بیوسورفکتانت‌ها ترکیبات دو گانه دوست شامل بخش‌های آبدوست و آبگریز هستند که منجر به کاهش کشش سطحی و بین سطحی در محلول‌های آبی و مخلوط‌های هیدروکربنی می‌شوند (Fazaeli *et al.*, 2012). این ترکیبات توسط گیاهان، حیوانات و میکروب‌ها به صورت متابولیت‌های ثانویه تولید می‌شوند؛ اغلب به سطح سلول میکروبی متصل باقی می‌مانند و یا به خارج از سلول ترشح می‌شوند. بیوسورفکتانت‌ها مزایای بالقوه زیادی نسبت به سورفکتانت‌های سنتزی دارند از قبیل سمیت پایین‌تر، قابلیت تجزیه زیستی بالاتر، تعامل بی‌خطر با محیط زیست و کف‌کنندگی بالاتر. علاوه بر این، آن‌ها مقادیر غلظت میسل بحرانی (CMC) پایین‌تری نسبت به سورفکتانت‌های مصنوعی دارند که باعث بهبود کارایی آن‌ها در کاربردهای مختلف می‌شود (Jahan *et al.*, 2020).

برخلاف سورفکتانت‌های سنتز شده شیمیایی، بیوسورفکتانت‌ها به‌طور کلی بر اساس منشأ میکروبی و ترکیب شیمیایی آن‌ها دسته‌بندی می‌شوند. از نظر شیمیایی، بیوسورفکتانت‌ها در گروه‌های گلیکولیپیدها (رامنولیپیدها)، ترهالولیپیدها، سوفورولیپیدها لیپوپپتیدها و لیپوپروتئین‌ها (سورفکتین، لیکنی سین)، اسیدهای چرب، فسفولیپیدها و لیپیدهای خنثی، پلیمرها و بیوسورفکتانت‌های ذره‌ای دسته‌بندی می‌شوند (Vijayakuma and Varatharajan, 2015).

انواع بیوسورفکتانت‌ها

از بین موجودات زنده تولید کننده بیوسورفکتانت، گونه‌های باکتریایی به دلیل تولید بیوسورفکتانت‌های مختلف به خوبی شناخته شده‌اند. باکتری‌هایی مانند *Pseudomonas*، جنس غالب در تولید بیوسورفکتانت هستند؛ همچنین گونه‌های *Bacillus*، از جمله معمول‌ترین باکتری‌های مورد استفاده در مدیریت حشرات آفت می‌باشند که عمدتاً با تولید ترکیباتی چون لیپوپپتیدها، لیکنی سین، سورفکتین، مجموعه لیپوپروتئین و سوبتیلیسین در کنترل حشرات دخالت دارند (Shekhar *et al.*, 2015). این بیوسورفکتانت‌ها بر اساس وزن مولکولی خود به دو دسته تقسیم می‌شوند: بیوسورفکتانت‌های با وزن مولکولی بالا و انواع با وزن مولکولی پایین. بیوسورفکتانت‌ها با وزن مولکولی بالا توسط تعدادی از گونه‌های متنوع باکتریایی تولید می‌شوند و به‌طور کلی بیوسورفکتانت‌های پلیمری هستند که از لیپوپروتئین‌ها، پروتئین‌ها، پلی ساکاریدها، لیپوپلی ساکاریدها یا کمپلکس‌ها تشکیل می‌شوند. گونه‌های *Acinetobacter* به‌عنوان گونه‌های باکتریایی تولیدکننده بیوسورفکتانت با وزن مولکولی بالا شناخته شده‌اند (de Lima *et al.*, 2008). اما بیوسورفکتانت‌های با وزن مولکولی پایین شامل گلیکولیپیدها، لیپوپپتیدها و لیپوپروتئین‌ها، اسیدهای چرب، فسفولیپیدها و چربی‌های خنثی هستند که نقش اصلی این سورفکتانت‌ها افزایش سطح بسترهای آبگریز است، در نتیجه قابلیت دسترسی زیستی بسترهای آبگریز را از طریق محلول‌سازی یا دفع و تنظیم اتصال و حذف میکروارگانسیم‌ها از سطح

افزایش می‌دهد (Vijayakuma and Varatharajan, 2015). گونه‌های سودوموناس و باسیلوس از جمله باکتری‌هایی هستند که به‌طور گسترده‌ای برای تولید بیوسورفکتانت با وزن مولکولی پایین شناخته شده‌اند.

کاربرد بیوسورفکتانت‌ها در کنترل حشرات آفت

تحقیقات نشان داده است که متابولیت‌های تولیدی توسط میکروارگانیسم‌ها توانایی کنترل آفات کشاورزی را دارند. در این میان باسیلوس‌ها مشهورترین باکتری‌های تولیدکننده بیوسورفکتانت می‌باشند. آن‌ها طیف گسترده‌ای از لیپوپپتیدها از جمله سورفکتین، ایتورین، باسیلومایسین، فنجی‌سین و لیکنی‌سین را تولید می‌کنند (Mukherjee and Das, 2005; Ghribi et al., 2012b). این ترکیبات متابولیت‌های فعال زیستی هستند که با فعالیت لارو کشی قوی باعث همولیز بدن لاروها می‌شوند. سورفکتین تولید شده توسط *Bacillus amyloliquefaciens* G1 Priest با تأثیر بر کوتیکول‌های شته و ایجاد کم‌آبی قابل توجه در غشای کوتیکول باعث ایجاد فعالیت حشره‌کشی در برابر *Myzus persicae* Sulzer می‌گردد (Cheon et al., 2013). علاوه بر این، محققین دیگر پتانسیل بیوسورفکتانت *B. amyloliquefaciens* AG1 را برای کنترل لارو *Tuta absoluta* Meyrick گزارش کرده‌اند که بیوسورفکتانت حاصل از این باکتری متشکل از لیپوپپتیدها و پلی‌کتیدها است (Ben Khedher et al., 2015). این بیوسورفکتانت‌ها با اتصال به گیرنده‌های واقع در وزیکول‌های غشای brush-border لارو، عمل می‌نمایند. به‌طور مشابه، بیوسورفکتانت‌های *B. thuringiensis* Vip3Aa16 و *B. amyloliquefaciens* AG1 قدرت حشره‌کشی در برابر *Spodoptera littoralis* نشان داده‌اند که معاینه هیستوپاتولوژیک روده لارو تیمار شده، علائمی نظیر بروز واکنش، نکروز و از هم پاشیدگی غشای پایه را نشان داده است (Ben Khedher et al., 2017).

از سال ۱۹۰۰، *Bacillus subtilis* Ehrenberg که معمولاً در لایه‌های بالایی خاک یافت می‌شود، در درمان بیماری‌های انسانی مورد استفاده قرار گرفته است و در حال حاضر گزارش‌ها نشان می‌دهند که عوامل بیوسورفکتانت این گونه در کنترل حشرات آفت کاربرد دارند. محققین نشان داده‌اند که *B. subtilis* SPB1 توانایی تولید بیوسورفکتانت لیپوپپتیدی با فعالیت حشره‌کشی علیه حشرات آفت همچون *Ectomyelois ceratoniae* Zeller را دارد (Mnif et al., 2013). اثرات هیستوپاتولوژیک بیوسورفکتانت *B. subtilis* SPB1 روی روده *E. ceratoniae* نیز مورد مطالعه قرار گرفت و تشکیل وزیکول در ناحیه آپیکال سلول‌ها، لیز و واکوالیزاسیون شدید سلول‌های ستونی را نشان داد. اثرات هیستوپاتولوژیک مشابهی بر روی *Ephestia kuehniella* Zeller (Ghribi et al., 2012b) و *S. littoralis* (Ghribi et al., 2012a) مشاهده شده است. از این طریق می‌توان فهمید که عوامل بیوسورفکتانت تولید شده توسط گونه‌های باسیلوس بافت روده را هدف قرار می‌دهند تا باعث مرگ حشرات شوند و روش کاربرد خوراکی را روشی مؤثر در تیمار معرفی کردند.

از طرف دیگر فعالیت حشره‌کشی رامنولیپیدهای جدا شده از *Pseudomonas* EP-3 بر علیه *M. persicae* گزارش شده است (Kim et al., 2011). *M. persicae* یکی از شته‌های مهم در سراسر جهان است که باعث کاهش چشمگیری در تولید کمی و کیفی محصول می‌شود. تغییر شکل برگ و انتشار بیمارگرهای گیاهی یا بیماری‌های ویروسی اثرات بارز شته‌ها روی محصولات هستند. تعدادی از آفت‌کش‌های سنتزی متداول به‌طور گسترده برای کنترل این شته‌ها استفاده می‌شوند اما ضربات بالقوه آن‌ها بر محیط و اثرات نامطلوب روی موجودات زنده غیر هدف، استفاده از ابزار دوستدار محیط زیست را پیشنهاد می‌کند. گزارش‌ها بیانگر آن بوده است که سوپرناتانت عاری از سلول EP-3 روی محیط نمک‌های معدنی گلوکز بیش از ۸۰ درصد از مرگ شته‌ها را در طول ۲۴ ساعت از تیمار نشان می‌دهد. رامنولیپیدهای استفاده شده در این تیمار فعالیت وابسته به دوز بر علیه شته‌ها با ۵۰ درصد مرگ در غلظت ۴۰ میکروگرم در میلی‌لیتر و ۱۰۰ درصد مرگ در غلظت ۱۰۰ میکروگرم در میلی‌لیتر را نشان دادند و آنالیز میکروسکوپی شته‌های تیمار شده با رامنولیپید نشان داد که مکانیسم حشره‌کشی، تخریب غشا کوتیکولی بوده است (Kim et al., 2011). سپس کمال و همکاران به بررسی جنس *Pseudomonas* سویه ICTB-745 و فعالیت‌های ضد میکروبی، سمیت سلولی، ضد تغذیه‌ای و حشره‌کشی آن

پرداختند. این باکتری ترکیبات فعال زیستی تولید می‌کند که شامل ۱-هیدروکسی فنازین، فنازین-۱-کربوکسیلیک اسید، رامنولیپید-۱ و رامنولیپید-۲ است. متابولیت‌های ثانویه این باکتری دارای فعالیت ضد میکروبی و سلول‌کشی علاوه بر فعالیت‌های ضد تغذیه‌ای و حشره‌کشی می‌باشد. آن‌ها دریافتند که رامنولیپیدها متابولیت‌های ضد تغذیه بر علیه *S. littoralis* و متابولیت‌های حشره‌کش بر علیه آفت انباری *Rhyzopertha dominica* Fabricius هستند که به‌عنوان عوامل کنترل آفت می‌توانند مورد استفاده قرار گیرند (Kamal et al., 2012). پس از آن کار بر روی بیوسورفکتانت‌های حشره‌کشی تولید شده توسط *Pseudomonas protegens* F6 Ramette انجام شد. آزمایش‌های گلخانه‌ای سوپرناتانت کشت یافته F6 نشان داد که مرگ و میر شته از ۵۱/۷۶ درصد به ۸۲/۱۴ درصد تغییر یافته است. رشد F6 با افزایش مرگ‌ومیر در شته‌ها و کاهش کشش سطحی آب همراه بود. همچنین کروماتوگرافی همراه با سایر آنالیزها همچون رزونانس مغناطیسی هسته‌ای (NMR) نشان داد که متابولیت اصلی تولید شده بر علیه *M. persicae* اورفامید A می‌باشد؛ دوز وابسته به مرگ‌ومیر اورفامید A بر علیه شته‌ها به میزان LC₅₀ ۳۴/۵ میکروگرم در میلی‌لیتر محاسبه گردید و کاهش چشمگیری در کشش سطحی آب از حدود ۳۵ میلی‌نیوتن در متر به ۱۰ میلی‌نیوتن در متر نشان داد (Jang et al., 2013). یک سال بعد توانایی تولید بیوسورفکتانت با خاصیت حشره‌کشی از باکتری *Stenotrophomonas maltophilia* Palleroni and Bradbury مورد ارزیابی قرار گرفت. طی این تحقیق بیوسورفکتانت خام تولید شده به‌عنوان رامنولیپید شناسایی گردید و نشان داده شد که میزان مرگ‌ومیر لارو پشه با افزایش زمان و غلظت بیوسورفکتانت افزایش یافت. به طوری که در طول ۷۲ ساعت مرگ‌ومیر مؤثر (LC₁₀₀) حتی در غلظت کم بیوسورفکتانت مشاهده گردید و آن را به‌عنوان یک بیوسورفکتانت تولید شده کارآمد با فعالیت لاروکشی معرفی نمودند (Korade and Sneha, 2014). از طرف دیگر Ochrosin استخراج شده از *Ochrobactrum* sp. BS-206 نیز فعالیت حشره‌کشی خود را بر علیه حشره بالغ سه آفت اصلی انباری غلات ذخیره شده همچون *T. castaneum* L.، *Sitophilus oryzae* L. و *Callosobruchus chinensis* L. به ترتیب با LC₅₀ معادل ۷/۳، ۷/۶ و ۸/۹ نشان داد (Kumar et al., 2014). علاوه بر این، سایر محققان ثابت کرده بودند که بیوسورفکتانت‌های لیپوپپتیدی و پلی‌کتیدی حاصل از *B. amyloliquefaciens* B. استرین AG1، اثر لاروکشی با LC₅₀ حدود ۱۸۰ نانوگرم در سانتی‌متر بر علیه لارو *Tuta absoluta* دارد. در واقع، این ترکیبات صدمات شدیدی به بافت‌های روده از جمله جداسازی و از هم‌پاشیدگی لایه اپیتلیال و ایجاد واکوئل سلولی ناشی از اثر بیوسورفکتانت‌ها، ایجاد کرده بودند (Ben Khedher et al., 2015). هازرا و همکاران ضمن بررسی سویه *Bacillus clausii* BS02 Nielsen نشان دادند که این باکتری قادر است در حضور روغن آفتابگردان به‌عنوان منبع کربنی، بیوسورفکتانت لیپوپپتیدی با خاصیت حشره‌کشی علیه آفات انباری مانند *C. chinensis* و *Maconellicoccus hirsutus* Green تولید کند که بیوسورفکتانت خام آن مخلوطی از سورفکتین و ایزومرهایش می‌باشد. خصوصیات لیپوپپتیدهای خام از لحاظ غلظت بحرانی میسل، کشش سطحی حداقل، کشش بین‌سطحی، فعالیت امولسیون‌کنندگی، فعالیت انحلال روغن و چربی کاربرد بالقوه بیوسورفکتانت در بخش‌های بیوتکنولوژی، زیست‌پزشکی و محیطی را نشان می‌دهد. این‌طور بیان نمودند که بیوسورفکتانت لیپوپپتیدی ممکن است برای مدیریت حشرات آفت، همچون بال‌پولکداران، محصولات انباری و آفات مکنده گیاهان مورد استفاده قرار گیرد (Hazra et al., 2015). لذا بیوسورفکتانت تولیدی نسبت به سایر بیوسورفکتانت‌های تولید شده توسط باکتری‌ها از طرف سازمان غذا و دارو آمریکا ایمن شناخته شده و باعث سوق دادن آن به سمت استفاده در تولید مقیاس صنعتی و کاربردهای پزشکی نیز می‌باشد. از طرف دیگر، در پی جستجوی باکتری‌های حشره‌کش بر علیه *M. persicae* دریافتند که ایزوله *Bacillus* Y9 خاصیت کشش سطحی بالا نشان می‌دهد و قادر به تولید متابولیت‌های حشره‌کشی است. بر اساس اطلاعات به‌دست آمده از آنالیزهای انجام شده، متابولیت‌ها به‌صورت ایزومرهای سورفکتین شامل C14[Leu7]، C14[Val7] و C15[Leu7] شناسایی شدند. در این میان ایزومرهای لوسین فعالیت حشره‌کشی بیشتری نسبت به ایزومرهای والین نشان دادند و متابولیت حاصل از Y9 به‌عنوان عامل کنترل زیستی بر علیه *M. persicae* معرفی گردید (Yang et al., 2017). همچنین در تحقیق دیگری نشان داده شد که بیوسورفکتانت لیپوپپتیدی حاصل از

در *Staphylococcus epidermidis* (Winslow and Winslow) و *Staphylococcus hominis* Kloos and Schleifer غلظت ۱۰۰۰۰ میکروگرم در گرم به ترتیب باعث مرگ‌ومیر ۶۶/۶۷ درصد و ۶۶/۶۳ درصد لاروهای سوسک آرد *Tribolium castaneum* Herbst می‌شوند؛ تکنیک‌هایی چون کروماتوگرافی لایه نازک و همچنین GCmass تأیید کننده ماده تولیدی بوده است (Fazaeli *et al.*, 2020; 2021). در واقع، بیوسورفکتانت‌های لیپوپپتیدی به دلیل توانایی در مختل کردن خصوصیات فیزیکی غشاهای سلولی و ایجاد اختلال در متابولیسم مشهور هستند. همچنین می‌توانند نفوذپذیری غشا را با تشکیل کانال یا انحلال غشا از طریق ورود به دو لایه لیپیدی به دلیل فعل و انفعالات آبگریز، تغییر دهند (Mnif *et al.*, 2013). در جدول ۱ خلاصه‌ای از بیوسورفکتانت‌های باکتریایی استخراج شده و تأثیر آن بر روی حشرات زیان‌آور کشاورزی نشان داده شده است.

جدول ۱- بیوسورفکتانت‌های باکتریایی استخراج شده و تأثیر آن بر روی آفات کشاورزی

Table 1. Extracted bacterial biosurfactants and their effects on agricultural insect pests

منابع References	حشره Insect	نوع فعالیت Activity	ترکیبات Component	بیوسورفکتانت‌ها Biosurfactants	گونه‌های باکتریایی Bacterial species
Ochoa-Campuzano., 2007	<i>Leptinotarsa decemlineata</i> Say	لاروکشی Larvicidal	Cry3Aa toxin	Unknown	<i>B. thuringiensis</i>
Geetha <i>et al.</i> , 2011; Das and Mukherjee., 2006; Geetha <i>et al.</i> , 2007	Mosquito	لاروکشی Larvicidal	Surfactin	Cyclic lipopeptides	<i>B. subtilis</i>
Ghribi <i>et al.</i> , 2012a	<i>S. littoralis</i>	لاروکشی Larvicidal	-	Lipopeptide	-
Geetha <i>et al.</i> , 2011	-	شغیره‌کشی Pupicidal	Unknown	Cyclic lipopeptides	<i>B. amyloliquefaciens</i>
Kim <i>et al.</i> , 2011	<i>M. persicae</i>	شغیره‌کشی Pupicidal	Rhamnolipid	Glycolipid	<i>Pseudomonas EP3</i>
Kamal <i>et al.</i> , 2012	<i>R. dominica</i>	حشره‌کشی Insecticidal	Rhamnolipid	Glycolipid	<i>Pseudomonas ICTB-745</i>
Ghribi <i>et al.</i> , 2012a	<i>E. kuehniella</i> <i>P. oleae</i> Bernard <i>S. littoralis</i> <i>E. ceratoniae</i>	لاروکشی Larvicidal	Surfactin	Lipopeptide	<i>B. subtilis</i> SPB1
Jang <i>et al.</i> , 2013	<i>M. persicae</i>	حشره‌کشی Insecticidal	Orfamid A	-	<i>P. protegens</i> F6
BenFarhat-Touzri <i>et al.</i> , 2013	<i>S. littoralis</i>	لاروکشی Larvicidal	Cry1Da toxin	Unknown	<i>thuringiensis</i> B
Revathi <i>et al.</i> , 2013	<i>Aedes aegypti</i> Linnaeus	لاروکشی Larvicidal	Surfactin	Cyclic lipopeptides	<i>B. subtilis</i>
Yun <i>et al.</i> , 2013	<i>M. persicae</i>	حشره‌کشی Insecticidal	Surfactin	Lipopeptide	<i>B. amyloliquefaciens</i> G1
Hazra <i>et al.</i> , 2015	<i>C.chinensis</i> <i>M. hirsutus</i>	حشره‌کشی Insecticidal	Surfactin	Lipopeptide	<i>B. clausii</i> BS02
Ben Khedher <i>et al.</i> , 2015	<i>T. absoluta</i>	لاروکشی Larvicidal	Surfactin, fengycin, iturin and bacillomycin	Lipopeptide	<i>B. amyloliquefaciens</i> AG1
-	-	-	Bacillaene, macrolactin, and diffidin	Polyketides	-
Ben Khedher <i>et al.</i> , 2017	<i>S. littoralis</i>	لاروکشی Larvicidal	Surfactin, fengycin, iturin and bacillomycin	Lipopeptide	<i>B. amyloliquefaciens</i> AG1
Yang <i>et al.</i> , 2017	<i>M. persicae</i>	حشره‌کشی Insecticidal	Surfactin	Cyclic lipopeptides	<i>Bacillus</i> Y9
Fazaeli <i>et al.</i> , 2020	<i>T. castaneum</i>	لاروکشی Larvicidal	-	Lipopeptide	<i>S. hominis</i>
Fazaeli <i>et al.</i> , 2021	<i>T. castaneum</i>	لاروکشی Larvicidal	-	Lipopeptide	<i>S. epidermidis</i>

بیوسورفکتانت‌ها در حفاظت از گیاهان بر علیه بیماری‌ها

علاوه بر کاربرد بیوسورفکتانت‌ها در کنترل حشرات آفت، این ترکیبات می‌توانند به‌عنوان عوامل جلوگیری‌کننده از شیوع بیماری‌های گیاهی نیز مورد استفاده قرار گیرند. جلوگیری از انتشار پوسیدگی ریشه قهوه‌ای کلم بروکلی حاصل از *Phytophthora cryptogea* Pethybr. and Laff. یکی از این موارد است (De Jonghe et al., 2005)؛ تیمار با رامنولپیدیها، کنترل زئوسپورها و کاهش بیماری را به‌طور چشمگیری نشان داد. لیپوپپتیدهای تولید شده توسط دو گونه از *B. subtilis* با ممانعت از رشد کنیدی‌ها، قادر به کاهش سفیدک پودری کلم حاصل از *Podosphaera fusca* Braun and Shishkoff بودند (Romero et al., 2007). همچنین سورفکتین-7 (Leu7) یک هپتاپپتید حلقوی متصل به اسید چرب بتاهیدروکسی تولید شده توسط *Bacillus mojavenis* RRC 101 Roberts به‌عنوان عامل کنترل زیستی برای *Fusarium verticillioides* Nirenberg گزارش گردید (Snook et al., 2009). همچنین رامنولپیدیهای Rha-C10-C10 و Rha-Rha-C10-C10 حاصل از *Pseudomonas aeruginosa* Schröter و *Burkholderia plantarii* Azegami از Rha-Rha-C14-C14 پاسخ‌های دفاعی قوی از جمله رویدادهای اولیه سیگنالینگ سلولی مانند نفوذ Ca^{+2} ، تولید اکسیژن واکنشی (ROS (Reactive Oxygen Species) و فعال‌سازی کیناز پروتئین‌های فعال شده با میتوزن (MAP) در انگور دارد (Varnier et al., 2009).

رامنولپیدیها سری زیادی از ژن‌های دفاعی شامل ژن‌های پروتئین مرتبط با بیماری‌زایی و ژن‌های دخیل در مسیرهای سنتز اکسی‌پین‌ها و فیتوآلکسین‌ها را القا می‌کنند. همچنین ثابت شده است که پاسخ‌های دفاعی رامنولپیدیها با سایر ترکیبات استخراج شده مانند کیتوزان و فیلترینگ محیط کشت قارچ *Botrytis cinerea* Pers القا می‌شود و نقش بی‌نظیر سایر رامنولپیدیها در حفاظت از انگور در مقابل بیمارگر *B. cinerea* مشاهده شده است؛ با این حال همچنان گیرنده‌های اختصاصی غشا پلاسمایی برای رامنولپیدیها و سایر بیوسورفکتانت‌ها مشخص نشده است.

بیوسورفکتانت‌های لیپوپپتیدی حلقوی حاصل از سودوموناس و باسیلوس‌ها از یک حلقه لاکتونی الیگوپپتیدی حلقوی متصل به دم اسید چرب ساخته شده که خصوصیات مقاومت القایی سیستمیک دارد. فانجیسین و سورفکتین‌های تولید شده توسط *B. subtilis* S499 از جمله ترکیباتی هستند که اثر محافظتی وابسته به مقاومت القایی سیستمیک بر روی گیاهان گوجه‌فرنگی بر علیه *B. cinerea* دارند (Ongena et al., 2007). به‌ر حال ساختار مولکول‌های بیوسورفکتانت برای ترویج مقاومت القایی سیستمیک مهم است. فانجیسین‌ها بر خلاف سورفکتین باعث القا واکنش دفاعی روی سلول‌های سیب‌زمینی می‌شوند، ولی هر دو سورفکتانت تغییرات وابسته به دفاع را در سلول‌های توتون القا می‌کنند (Ongena and Jacques, 2008). این موضوع که ویژگی مقاومت القایی سیستمیک بیوسورفکتانت ممکن است بسته به گیاه و بیمارگر تفاوت داشته باشد، بسیار قابل توجه است. به‌طوری‌که مکانیسم مقاومت القایی سیستمیک گزارش شده برای سورفکتین اختلال غشا پلاسمایی گیاه و فعال شدن واکنش دفاعی در گیاه می‌باشد (Jourdan et al., 2009). باکتری‌های اندوفیتیک گیاهی نقش کلیدی در توانایی گیاه میزبان برای سازگاری با محیط آلوده را دارند. بر همین اساس است که میکروارگانیسم‌های اندوفیتیک پتانسیل تجاری کافی به‌عنوان عوامل کنترل بیولوژیکی بیمارگرهای گیاهی و افزایش عملکرد گیاه و ارزش غذایی محصولات کشاورزی را دارند. برای مثال *Pseudomonas putida* Trevisan گونه ۲۶۷ اندوفیتیک گیاهی است که القاکننده رشد گیاه فلفل سیاه بوده و از ریزوسفر آن جدا شده و بیوسورفکتانت حاصل از این سویه باعث تجزیه زئوسپورهای اوومیست بیمارگر *Phytophthora capsici* Leonian می‌شود (Kruijt et al., 2009).

بیوسورفکتانت‌های لیپوپپتیدی دیگری نیز گزارش شده است که فعالیت‌های زیستی مهمی دارند. ولهو و همکاران نشان دادند که بیوسورفکتانت تولید شده توسط باسیلوس از رشد قارچ‌های بیمارگر گیاهی از قبیل *Aspergillus* / *Fusarium* و *Bipolaris sorokinianas* Shoemaker ممانعت می‌نماید (Velho et al., 2011). از طرف دیگر، گونه *Brevibacillus brevis* Migula HOB1 ایزوفرمی از سورفکتین لیپوپپتیدی با ویژگی‌های ضدباکتریایی و ضدقارچی قوی تولید می‌کند که می‌تواند برای کنترل عوامل بیماری‌زای گیاهی استفاده شود.

رامنولپیدها به‌عنوان قارچ‌کش زیستی

رامنولپیدها گلیکولپیدهایی هستند که توسط گونه‌های مختلف باکتریایی از جمله برخی از گونه‌های *Pseudomonas* و *Burkholderia* تولید می‌شوند (Abdel-Mawgoud *et al.*, 2010). مطالعات زیادی فعالیت‌های ضدقارچی آن‌ها را بر روی عوامل بیماری‌زای مؤثر بر محصولات را شرح داده‌اند. این فعالیت‌ها عمدتاً بر روی قارچ‌ها و اومایست‌ها از جمله گونه‌های *Botrytis sp.*, *Rhizoctonia sp.*, *Fusarium sp.*, *Alternaria sp.*, *Pythium sp.* یا *Phytophthora sp.* بوده است. مطالعات مختلف از رامنولپیدهای حاصل از *P. aeruginosa* به تنهایی یا به‌صورت مخلوط یا مولکول‌های خالص استفاده نمودند. در میان تمام ترکیباتی که در این مخلوط‌ها وجود دارند، مونو رامنولپیدهای خالص شده (Rha-C10-C10) و دی‌رامنولپیدها (Rha-Rha-C10-C10) به‌طور کلی قوی‌ترین فعالیت را نشان می‌دهند. علاوه بر این، تمامی مطالعات یک اثر ضد میکروبی متعارف مانند تجزیه زئوسپور، عدم تکامل جوانه‌زنی اسپور و مهار رشد میسیلیوم را نشان داده‌اند. به دلیل ماهیت دوگانه دوستی، گلیکولپیدها باید قادر به تعامل مستقیم با غشاهای پلاسمایی باشند (Otzen, 2017).

لیپوپپتیدها به‌عنوان عوامل ضد میکروبی

بیوسورفکتانت‌های لیپوپپتیدی از اتصال یک دم لیپیدی به یک الیگوپپتید خطی کوتاه یا حلقوی تشکیل شده است. این مواد توسط قارچ‌ها و باکتری‌ها تولید شده و به دلیل خاصیت ضد میکروبی، سمیت سلولی، ضدتوموری، سرکوب‌کننده سیستم ایمنی و خصوصیات سورفاکتانت مورد توجه بسیاری قرار گرفته‌اند. لیپوپپتیدهای حلقوی (CLP) نمایانگر دسته‌ای از بیوسورفکتانت‌ها هستند که به‌طور گسترده توسط گونه‌های مختلف باکتریایی تولید می‌شود و از آن‌ها با عنوان باکتری‌های مفید گیاهان یاد می‌شود. در این میان، باسیلوس و سودوموناس به‌عنوان عوامل کنترل بیولوژیک مورد استفاده قرار گرفتند و همچنین برای تولید طیف وسیعی از CLP‌ها با ساختاری متمایز و چند منظوره با فعالیت‌های بیولوژیکی قوی مربوط به حفاظت گیاه شناخته شده‌اند (Crouzet *et al.*, 2020). CLP‌های باکتریایی عوامل بیوسورفکتانت قدرتمندی هستند که فعالیت‌های بی‌ثبات‌کننده زیادی را در غشای زیستی ایجاد می‌کنند. فعالیت ضد میکروبی آن‌ها به‌خوبی در زمینه کنترل بیولوژیک از طریق مهار مستقیم عوامل بیماری‌زای گیاهی ثبت شده است. استفاده از CLP‌های خالص یا ناخالص در آزمایشگاه دامنه بسیار گسترده‌ای از عوامل بیماری‌زای گیاهی قارچی و اومایسیست را تحت تأثیر قرار داده‌اند که تحت تأثیر CLP‌های باکتریایی مانند فنجی سین (fengycin) و ایتورین (iturin)‌ها به ترتیب برای باسیلوس (Caulier *et al.*, 2019؛ Rabbee *et al.*, 2019) و سودوموناس (Geudens and Martins, 2018)؛ Götze and Stallforth, 2020) قرار دارند. بسیاری از مطالعات نشان می‌دهد که فعالیت CLP با توانایی آن‌ها در به خطر انداختن ثبات غشای سلول قارچی مرتبط است، در نتیجه منجر به نشت سیتوپلاسم و مرگ هیف یا مهار جوانه‌زنی اسپور می‌شود (Gong *et al.*, 2015؛ Romero *et al.*, 2007).

تحریک ایمنی گیاهی توسط بیوسورفکتانت‌ها

از آنجا که بیشتر مطالعات انجام شده روی بیوسورفکتانت‌های گلیکولپیدی بر فعالیت‌های ضد میکروبی و ضدپوسیدگی آن‌ها متمرکز بود، اخیراً کشف شد که رامنولپیدها ممکن است ایمنی ذاتی گیاه را تحریک کنند. رامنولپیدها باعث بروز رویدادهای سیگنالینگ اولیه مانند تجمع ROS در تاک انگور و گیاه *Brassica napus* L. (Monnier *et al.*, 2018؛ Varnier *et al.*, 2009) و همچنین هجوم کلسیم و آبشار فسفوریلاسیون در انگور می‌شوند (Varnier *et al.*, 2009). رسوب کالوز، تولید هورمون، فعال شدن ژن دفاعی و یک واکنش حساس از دیگر علائم ایمنی ناشی از رامنولپید در Brassicaceae و انگور است (Varnier *et al.*, 2009؛ Sanchez *et al.*, 2012؛ Monnier *et al.*, 2018). علاوه بر این، رامنولپید پاسخ‌های دفاعی ناشی از سایر الفاکننده‌ها مانند کیتوزان را تقویت می‌کند. پاسخ ایمنی ایجاد شده توسط رامنولپیدها همچنین در مقاومت موضعی در برابر *B. cinerea* و قارچ

همی‌بیوتروفیک *Leptosphaeria maculans* Karsten در *B. napus* نقش دارد (Monnier et al., 2018; 2020). استقرار رامنولیپید بین دو لایه لیپیدی بر پویایی لیپیدی تأثیر شدیدی نمی‌گذارد؛ اما ماهیت استرول‌های گیاهی می‌تواند بر تأثیر گلیکولیپیدها بر بی‌ثباتی غشای پلاسمای گیاه تأثیر بگذارد. این تغییرات ظریف در پویایی لیپید می‌تواند با القا دفاع گیاه ارتباط داشته باشد (Monnier et al., 2019).

از طرف دیگر محققین نشان دادند که تیمار گیاه لفل با رامنولیپیدها منجر به محافظت بیشتر در برابر بیماری بلایت فیتوفتورای (*Phytophthora blight*) می‌شوند و همچنین از ایجاد عفونت *Colletotrichum orbiculare* Berk. and Mont بر روی برگ‌های گیاهان خیار جلوگیری می‌کنند (Kim et al., 2000). رامنولیپیدها به‌طور قابل توجهی میزان بروز بیماری میرایی ناشی از آب توسط *Phytophthora* sp. و *Pythium* sp. را کاهش می‌دهند (Yoo et al., 2005).

لیپوپپتیدها به عنوان القاکننده‌های قدرتمند مقاومت سیستماتیک گیاهان

پتانسیل فنجی‌سین و سورفکتین برای ایجاد مقاومت سیستمیک گیاه ابتدا در گیاهان لوبیا و گوجه‌فرنگی نشان داده شد. هنگامی که این ترکیبات به‌صورت خالص در غلظت‌های میکرومولار استفاده می‌شوند، باعث کاهش قابل توجه بیماری در لوبیا و گوجه‌فرنگی آلوده به *B. cinerea* می‌شوند (Ongena et al., 2007). اخیراً، طی مطالعه‌ای بر روی طیف وسیعی از جدایه‌های طبیعی باسیلوس، نقش سورفکتین را به‌عنوان القاکننده ISR (مقاومت سیستمیک القا شده) تقویت کرد، زیرا ارتباط زیادی بین فعالیت‌های القایی دفاع و میزان سورفکتین تولید شده توسط سویه‌های مختلف مشاهده شد (Cawoy et al., 2014). به همین ترتیب، سویه‌های جهش یافته *Bacillus velezensis* FZB42 که قادر به سنتز سورفکتین نیستند، در پاسخ سیستمیک القا شده خود به *Rhizoctonia solani* J.G. Kühn در کاهو دچار اختلال می‌شوند (Chowdhury et al., 2015). مطالعات بیشتر باعث افزایش نقش مقاومت سیستماتیک القایی سورفکتین در گیاهان دیگر شد. به‌عنوان مثال، نشان داده شد که سورفکتین خالص باعث افزایش مقاومت در برابر سفیدک پودری خیار در گیاه خربزه می‌شود (García-Gutiérrez et al., 2013). در *Penicillium digitatum* Pers، سورفکتین پاسخ‌های دفاعی مربوط به تولید مولکول‌های سیگنال را برای فعال‌سازی مقاومت سیستماتیک القایی تحریک می‌کند (Waeathongrak et al., 2014). این لیپوپپتید پاسخ ذاتی گیاه را در برابر قارچ *Magnaporthe oryzae* M.E. Barr چمن چند ساله (Rahman et al., 2015) یا *Plasmopara viticola* Berk. and M.A. Curtis در انگور فعال می‌کند (Li et al., 2019). همچنین آلودگی حاصل از *Polymyxa betae* Keskin ناقل بیماری ریزومانیا در چغندر قند (Desoignies et al., 2013) یا *Colletotrichum gloeosporioides* Spauld. and H. Schrenk در برگ‌های توت‌فرنگی را کاهش می‌دهد (Yamamoto et al., 2015). سرانجام، مطالعه اخیر نشان داد که شیوع بیماری با *Sclerotium rolfsii* C.C. Tu and Kimbr هنگام پیش‌تیمار با سورفکتین در *Arachis hypogaea* Linnaeus به شدت کاهش می‌یابد (Rodríguez et al., 2018). همچنین دفاع القایی گیاه توسط لیپوپپتید حلقوی از گروه ایتورین نیز در بعضی از موارد گزارش شده است. تحقیقات نشان داده است که ایتورین A نقشی مشابه سورفکتین در برگ‌های توت‌فرنگی دارد (Yamamoto et al., 2015) و همچنین به‌عنوان القاکننده بیان ژن دفاعی گیاه در گیاهان پنبه پس از مواجهه با *Verticillium dahliae* Kelb عمل می‌کند (Han et al., 2015). مایکوسوبتیلین نیز کارآمدترین لیپوپپتیدی است که باعث ایجاد پاسخ ایمنی در انگور می‌شود (Farace et al., 2015). در مقایسه با سورفکتین، باسیلومایسین D تولید شده توسط *B. velezensis* SQR9 دارای اثر قابل مقایسه‌ای در پاسخ مقاومت القایی *Arabidopsis* برای جلوگیری از عفونت توسط *Pseudomonas syringae* Van Hall یا *B. cinerea* است (Wu et al., 2018). در گیاهان گندم، مقاومت در برابر *Zymoseptoria tritici* J. Schröt. توسط سورفکتین خالص مورد استفاده در غلظت‌های ۱ تا ۱۰۰ میکرومولار فعال شد (Le Mire et al., 2018). همچنین برخی از لیپوپپتیدهای حلقوی توسط *Pseudomonas* sp. فعالیت مقاومت القایی سیستمیک را نشان می‌دهد. برای اولین بار نشان داده شد که *massetolide* A تولید شده توسط سویه *Pseudomonas fluorescens* SS101 Flügge فعالیت مقاومت القایی سیستمیک را در گیاهان گوجه‌فرنگی برای

کنترل *Phytophthora infestans* de Bary حفظ می‌کند (Tran et al., 2007). علاوه بر این محققین نشان دادند که *Pseudomonas* sp. سویه CMR12a یک ایزوله جدا شده از خاک است که پتانسیل کنترل زیستی مناسبی در برابر *R. solani* دارد و عملکرد آن عمدتاً به تأثیر متقابل دو لیپوپپتید مختلف (سسیلین و اورفامید) و فنالین برای ایجاد ایمنی گیاه بستگی دارد (D'aes et al., 2011; 2014). این لیپوپپتیدهای حلقوی همچنین در محافظت از *Brassica chinensis* L. در برابر *R. solani* فعال بودند (Olorunleke et al., 2015). همچنین محققین نشان دادند که در برنج نیز ارفامید و سایر لیپوپپتیدهای حلقوی سودوموناس مانند WLIP، لوکیسین و آنتولیزین باعث مقاومت در برابر *Cochliobolus miyabeanus* S. Ito and Kurib. یا *M. oryzae* شدند (Ma et al., 2016; 2017; Omoboye et al., 2019).

تاکنون چگونگی عملکرد لیپوپپتیدها و شناسایی آن‌ها توسط سلول‌های گیاهی برای فعال کردن پاسخ سیستمیک القا شده مشخص نشده است. فعال شدن ژن‌های دفاعی در *Arabidopsis* تیمار شده با ایتورین A نیز به ساختار مولکول، یعنی حلقوی بودن یا ماهیت زنجیره اسیدهای چرب، وابسته است (Kawagoe et al., 2015). همانند رامنولپیدها، این فرضیه مطرح است که لیپوپپتیدها توانایی ایجاد اختلال در غشای پلاسمایی گیاه را دارند و در نتیجه می‌توانند زنجیره‌ای از واکنش‌های مولکولی منتهی به فعال‌سازی مکانیسم‌های دفاعی را فعال کنند (Schellenberger et al., 2019).

نتیجه‌گیری

بیوسورفکتانت‌های تولید شده توسط باکتری‌ها، مخمرها و قارچ‌ها، مولکول‌های پرکاربردی هستند زیرا به دلیل پتانسیل تولید تجاری در مقیاس‌های بزرگ، سمیت کم و تجزیه بیولوژیکی بالا، بسیار کارآمد هستند. در این بررسی، اثر بیوسورفکتانت‌های مختلف تولید شده توسط میکروارگانیسم‌ها به‌خصوص باکتری‌ها بر روی حشرات آفت کشاورزی و همچنین پتانسیل رامنولپیدها و لیپوپپتیدها برای محافظت از گیاهان در زمینه کشاورزی ارائه گردید. اگرچه ده‌ها گونه باکتریایی و قارچی با توانایی تولید بیوسورفکتانت گزارش شده‌اند، اما مطالعات ناچیزی به کاربرد ماده بیوسورفکتانت حاصل از این گونه‌ها علیه حشرات آفت اشاره داشته است.

بیشتر بیوسورفکتانت‌ها در مقیاس کوچک در آزمایشگاه‌ها تولید شده‌اند. تولید انبوه این مواد برای تولید محصول با کیفیت، نیاز به مطالعه دقیق دارد. مطالعات ژنومی و رونویسی، در مطالعه نحوه عملکرد آن‌ها بسیار مهم است که در نهایت چنین تحقیقاتی به کشف سموم زیستی جدید منتهی می‌شود. این مولکول‌ها با محافظت از گیاهان به دلیل دارا بودن خواص ضد میکروبی و تحریک ایمنی گیاه، اثرات دوگانه مشابهی دارند. بنابراین احتمال می‌رود که نحوه عملکرد رامنولپیدها در برابر بیمارگرهای گیاهی تولیدکننده ژئوسپور، تجزیه مستقیم ژئوسپورها از طریق درهم آمیختن گلیکولیپیدها در غشاهای پلاسمایی باشد که توسط دیواره سلولی محافظت نمی‌شوند (Stanghellini and Miller, 1997). همچنین رامنولپیدها می‌توانند سلول‌های میسلی را تحت تأثیر قرار داده و در نتیجه باعث بی‌ثباتی یا تجزیه آن‌ها شوند و ترکیبات مونو و دی‌رامنولپیدهای خالص شده قادرند به دو لایه فسفاتیدیل کولین و فسفاتیدیل اتانول آمین نفوذ کرده و به‌ویژه بسته‌بندی آن‌ها را تغییر دهند (Ortiz et al., 2006). بنابراین با توجه به توضیحات داده شده نفوذ رامنولپیدها می‌تواند باعث ایجاد اختلالاتی در ساختار و عملکرد غشاها شود. این ترکیبات همچنین خصوصیات فیزیکوشیمیایی دو لایه را تغییر داده و وضعیت آبرسانی بین آب و لیپید را مختل می‌کنند. بسته به ترکیب لیپیدی غشا و غلظت آن‌ها، رامنولپیدها قادر به نفوذ در غشا و تجزیه آن هستند (Sánchez et al., 2010). برای درک بهتر مکانیسم‌های عملکرد بیوسورفکتانت‌ها، آزمایش‌های آتی نه تنها بر روی ترکیب مخلوط، بلکه بر روی مولکول‌های بسیار خالص‌سازی شده نیز باید انجام شود. با این وجود، همچنان موانع متعددی برای توسعه کاربرد رامنولپیدها و لیپوپپتیدها باقی مانده است. هزینه‌های تولید بیوسورفکتانت، اثرات آن‌ها در مزرعه و خلوص ترکیبات باید بهبود یابد تا امکان استفاده در درجه بالاتر در حفاظت از محصول فراهم شود. از این نظر، برای افزایش کارایی در شرایط مزرعه‌ای، باید ترکیب

بیوسورفکتانت‌ها در نظر گرفته شود و در نهایت با توجه به خصوصیات جالب توجه آن‌ها، اکنون زمان آن فرا رسیده است که عوامل سازگار با محیط زیست را به‌عنوان کنترل‌کننده‌های زیستی در مدیریت تلفیقی آفات در نظر بگیریم.

References

- Abdel-Mawgoud, A. M., Lepine, F. and Deziel, E. 2010.** Rhamnolipids: diversity of structures, microbial origins and roles. *Applied Microbiology and Biotechnology* 86: 1323–1336.
- Akladios, S. A., Gomma, E. Z. and El-Mahdy, O. M. 2019.** Efficiency of bacterial biosurfactant for biocontrol of *Rhizoctonia solani* (AG-4) causing root rot in faba bean (*Vicia faba*) plants. *European Journal of Plant Pathology* 153: 15–35.
- BenFarhat-Touzri, D., Saadaoui, M., Abdelkefi-Mesrati, L., Saadaoui, I., Azzouz, H. and Tounsi S. 2013.** Histopathological effects and determination of the putative receptor of *Bacillus thuringiensis* Cry1Da toxin in *Spodoptera littoralis* midgut. *Journal of Invertebrate Pathology* 112: 142–145.
- Ben Khedher, S., Boukedi, H., Kilani-Feki, O., Chaib, I., Laarif, A., Abdelkefi-Mesrati, L. and Tounsi, S. 2015.** *Bacillus amyloliquefaciens* AG1 biosurfactant: putative receptor diversity and histopathological effects on *Tuta absoluta* midgut. *Journal of Invertebrate Pathology* 132: 42–47.
- Ben Khedher, S., Boukedi, H., Dammak, M., Kilani-Feki, O. and Sellami-Boudawara, T. 2017.** Combinatorial effect of *Bacillus amyloliquefaciens* AG1 biosurfactant and *Bacillus thuringiensis* Vip3Aa16 toxin on *Spodoptera littoralis* larvae. *Journal of Invertebrate Pathology* 144: 11–17.
- Caulier, S., Nannan, C., Gillis, A., Licciardi, F., Bragard, C. and Mahillon, J. 2019.** Overview of the antimicrobial compounds produced by members of the *Bacillus subtilis* group. *Frontiers in Microbiology* 10: 302.
- Cawoy, H., Mariutto, M., Henry, G., Fisher, C., Vasilyeva, N. and Thonart, P. 2014.** Plant defense stimulation by natural isolates of *Bacillus* depends on efficient surfactin production. *Molecular Plant-Microbe Interactions* 27: 87–100.
- Cheon Yun, D., Yang, S., Kim, Y., Seon Kim, I. and Hwan Kim, Y. 2013.** Identification of surfactin as an aphidical metabolite produced by *Bacillus amyloliquefaciens* G1. *Journal of the Korean Society for Applied Biological Chemistry* 56(6): 751–753.
- Chowdhury, S. P., Hartmann, A., Gao, X. and Borriss, R. 2015.** Biocontrol mechanism by root-associated *Bacillus amyloliquefaciens* FZB42 - a review. *Frontiers in Microbiology* 6: 780.
- Crouzet, J., Arias, A. A., Cordelier, S. D., Cordelier, S., Prsic, J., Hoff, G., Gourbeyre, F. M., Baillieul, F., Clement, C., Ongena, M. and Dorey, S. 2020.** Biosurfactants in plant protection against diseases: Rhamnolipids and lipopeptides case study. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology* 8(1014): 1-11.
- D'aes, J., Hua, G. K., De Maeyer, K., Pannecouque, J., Forrez, I. and Ongena, M. 2011.** Biological control of *Rhizoctonia* root rot on bean by phenazine and cyclic lipopeptide-producing *Pseudomonas* CMR12a. *Phytopathology* 101: 996–1004.
- D'aes, J., Kieu, N. P., Léclère, V., Tokarski, C., Olorunleke, F. E. and De Maeyer, K. 2014.** To settle or to move? The interplay between two classes of cyclic lipopeptides in the biocontrol strain *Pseudomonas* CMR12a. *Environmental Microbiology* 16: 2282–2300.
- Das, K. and Mukherjee, A. K. 2006.** Assessment of mosquito larvicidal potency of cyclic lipopeptides produced by *Bacillus subtilis* strains. *Acta Tropica* 97: 168–173.
- De Jonghe, K., De Dobbelaere, I., Sarrazyn, R. and Höfte, M. 2005.** Control of *Phytophthora cryptogea* in the hydroponic forcing of witloof chicory with the rhamnolipid-based biosurfactant formulation PRO1. *Plant Pathology* 54: 219–226.
- de Lima, C. J. B., Ribeiro, E. J., Sérvulo, E. F. C., Resende, M. M. and Cardoso, V. L. 2008.** Biosurfactant production by *Pseudomonas aeruginosa* grown in residual soybean oil. *Applied Biochemistry and Biotechnology* 152: 156.
- Desoignies, N., Schramme, F., Ongena, M. and Legrève, A. 2013.** Systemic resistance induced by *Bacillus lipopeptides* in *Beta vulgaris* reduces infection by the rhizomania disease vector *Polymyxa betae*. *Molecular Plant Pathology* 14: 416–421.
- Droby, S. (Ed.). 2020.** Food Security and Plant Disease Management; Elsevier Science and Technology: Amsterdam, The Netherlands.
- Farace, G., Fernandez, O., Jacquens, L., Coutte, F., Krier, F. and Jacques, P. 2015.** Cyclic lipopeptides from *Bacillus subtilis* activate distinct patterns of defence responses in grapevine. *Molecular Plant Pathology* 16: 177–187.
- Fazaeli, N., Bahador, N. and Jamalian, A. 2012.** Isolation and identification of gram positive biosurfactant producing bacterial from Mighan wetland in Iran. *Nature Environment and Pollution Technology* 11(4): 591-594.

- Fazaeli, N., Bahador, N. and Hesami, Sh. 2020.** The effect of biosurfactant isolated from *Staphylococcus hominis* as a pesticide on red flour beetle larvae. *Biocontrol in Plant Protection* 7(2): 159–164.
- Fazaeli, N., Bahador, N. and Hesami, Sh. 2021.** A study on larvicidal activity and phylogenetic analysis of *Staphylococcus epidermidis* as a biosurfactant-producing bacterium. *Polish Journal of Environmental studies* 30(5): 1–9.
- Edosa, T. T., Hun Jo, Y., Keshavarz, M. and Soo Han, Y. 2018.** Biosurfactants: production and potential application in insect pest management. *Trends in Entomology* 14: 79-87.
- García-Gutiérrez, L., Zerriouh, H., Romero, D., Cubero, J., de Vicente, A. and Pérez-García, A. 2013.** The antagonistic strain *Bacillus subtilis* UMAF6639 also confers protection to melon plants against cucurbit powdery mildew by activation of jasmonate- and salicylic acid-dependent defence responses. *Microbial Biotechnology* 6: 264–274.
- Geetha, I., Prabakaran, G., Paily, K. P., Manonmani, A. M. and Balaraman, K. 2007.** Characterisation of three mosquitocidal *Bacillus* strains isolated from mangrove forest. *Biological Control* 42: 34-40.
- Geetha, I., Manonmani, A. M. and Prabakaran, G. 2011.** *Bacillus amyloliquefaciens*: a mosquitocidal bacterium from mangrove forests of Andaman and Nicobar islands, India. *Acta Tropica* 120: 155–159.
- Geudens, N. and Martins, J. C. 2018.** Cyclic lipopeptides from *Pseudomonas* spp.- biological swiss-army knives. *Frontiers in Microbiology* 9: 1-18.
- Ghribi, D., Abdelkefi-Mesrati, L., Boukedi, H., Elleuch, M., Chaabouni Ellouz, S. and Tounsi, S. 2012a.** The impact of the *Bacillus subtilis* SPB1 biosurfactant on the midgut histology of *Spodoptera littoralis* (Lepidoptera: Noctuidae) and determination of its putative receptor. *Journal of Invertebrate Pathology* 109(2): 183–186.
- Ghribi, D., Elleuch, M., Abdelkefi, L. and Ellouze-Chaabouni, S. 2012b.** Evaluation of larvicidal potency of *Bacillus subtilis* SPB1 biosurfactant against *Ephestia kuehniella* (Lepidoptera: Pyralidae) larvae and influence of abiotic factors on its insecticidal activity. *Journal of Stored Products Research* 48: 68-72.
- Gill, H. K. and Garg, H. 2014.** Pesticide: Environmental impacts and management strategies. *Pesticides-Toxic Aspects* 8: 187-230.
- Gong, A. D., Li, H. P., Yuan, Q. S., Song, X. S., Yao, W. and He, W. J. 2015.** Antagonistic mechanism of iturin A and plipastatin A from *Bacillus amyloliquefaciens* S76-3 from wheat spikes against *Fusarium graminearum*. *PLoS One* 10: 1-18.
- Götze, S. and Stallforth, P. 2020.** Structure, properties, and biological functions of nonribosomal lipopeptides from *pseudomonads*. *Natural Product Reports* 37: 29–54.
- Haddad, N. I.; Wang, J.; Mu, B. 2008.** Isolation and characterization of a biosurfactant producing strain, *Brevibacillus brevis* HOB1. *Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology* 35: 1597–1604.
- Han, Q., Wu, F., Wang, X., Qi, H., Shi, L. and Ren, A. 2015.** The bacterial lipopeptide iturins induce *Verticillium dahliae* cell death by affecting fungal signalling pathways and mediate plant defence responses involved in pathogen-associated molecular pattern-triggered immunity. *Environmental Microbiology* 17: 1166–1188.
- Hazra, C., Kundu, D. and Chaudhari, A. 2015.** Lipopeptide biosurfactant from *Bacillus clausii* BS02 using sunflower oil soapstock: evaluation of high throughput screening methods, production, purification, characterization and its insecticidal activity. *RSC Advances* 5: 2974–2982.
- Hussain, T., Haris, M., Shakeel, A., Ahmad, G., Khan, A. A. and Khan, M. A. 2020.** Bio-nematicidal activities by culture filtrate of *Bacillus subtilis* HussainT-AMU: New promising biosurfactant bioagent for the management of Root Gallings caused by *Meloidogyne incognita*. *Vegetos* 33: 229–238 .
- Jahan, R., Bodratti, A. M., Tsianou, M. and Alexandridis, P. 2020.** Biosurfactants, natural alternatives to synthetic surfactants: physicochemical properties and applications. *Advances in Colloid and Interface Science* 275: 1–22.
- Jang, J. Y., Yang, S. Y., Kim, Y. C., Lee, C. W., Park, M. S., Kim, J. C. and Kim, I. S. 2013.** Identification of orfamide A as an insecticidal metabolite produced by *Pseudomonas protegens* F6. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 61: 6786-91.
- Jibrin, M. O., Liu, Q., Jones, J. B. and Zhang, S. 2021.** Surfactants in plant disease management: A brief review and case studies. *Plant Pathology* 70: 495–510.
- Jourdan, E., Henry, G., Duby, F., Dommès, J., Barthelemy, J. P. and Thonart, P. 2009.** Insights into the defense-related events occurring in plant cells following perception of surfactin-type lipopeptide from *Bacillus subtilis*. *Molecular Plant-Microbe Interactions* 22: 456–468.
- Kamal, A., Shaik, A. B., Kumar, C. G., Mongolla, P., Rani, P. U., Krishna, K., Mamidyala, S. K. and Joseph, J. 2012.** Metabolic profiling and biological activities of bioactive compounds produced by *Pseudomonas* sp. Strain ICTB-745 isolated from Ladakh, India. *Journal of Microbiology and Biotechnology* 22: 69–79.

- Kawagoe, Y., Shiraishi, S., Kondo, H., Yamamoto, S., Aoki, Y. and Suzuki, S. 2015.** Cyclic lipopeptide iturin A structure-dependently induces defense response in *Arabidopsis* plants by activating SA and JA signaling pathways. *Biochemical and Biophysical Research Communications* 460: 1015–1020.
- Kim, B. S., Lee, J. Y. and Hwang, B. K. 2000.** In vivo control and in vitro antifungal activity of rhamnolipid B, a glycolipid antibiotic, against *Phytophthora capsici* and *Colletotrichum orbiculare*. *Pest Management Science* 56: 1029–1035.
- Kim, S. K., Kim, Y. C., Lee, S., Kim, J. C., Yun, M. Y. and Kim, I. S. 2011.** Insecticidal activity of rhamnolipid isolated from *Pseudomonas* sp. EP-3 against green peach aphid (*Myzus persicae*). *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 59: 934–938.
- Korade, D. and Sneha, P. 2014.** Larvicidal activity of rhamnolipid biosurfactant produced by *Stenotrophomonas maltophilia*. *International Journal of Scientific and Engineering Research* 5: 60–63.
- Koul, O. 2011.** Microbial biopesticides: opportunities and challenges. *CAB Reviews* 6: 1–26.
- Kruijt, M., Tran, H. and Raaijmakers, J. M. 2009.** Functional, genetic and chemical characterization of biosurfactants produced by plant growth-promoting *Pseudomonas putida* 267. *Journal of Applied Microbiology* 107: 546–556.
- Kumar, C. G., Sujitha, P., Mamidyala, S. K., Usharani, P., Das, B. and Reddy, C. R. 2014.** Ochrosin, a new biosurfactant produced by halophilic *Ochrobactrum* sp. strain BS-206 (MTCC 5720): purification, characterization and its biological evaluation. *Process Biochemistry* 49: 1708–1717.
- Kumar, M., Kour, D., Yadav, A. N., Saxena, R., Rai, P. K. and Jyoti, A. 2019.** Biodiversity of methylophilic microbial communities and their potential role in mitigation of abiotic stresses in plants. *Biologia* 74: 287–308.
- Kumar, A., Zhimo, Y., Biasi, A., Salim, S., Feygenberg, O., Wisniewski, M., Droby, S. 2021.** Endophytic Microbiome in the Carposphere and Its Importance in Fruit Physiology and Pathology. Pp. 73–88. In: Spadaro, D., Droby, S. and Gullino, M. L. (eds.). *Postharvest pathology: Plant pathology in the 21st century*. Volume 11, Springer: Cham, Switzerland.
- Kumari, S., Chourasia, S. K., Jha, M. N., Kant, R., Singh, U. and Kumar, P. 2014.** Microbial pesticide: a boom for sustainable agriculture. *International Journal of Scientific and Engineering Research* 5: 1394–1397.
- Le Mire, G., Siah, A., Brisset, M. N., Gaucher, M., Deleu, M. and Jijakli, M. H. 2018.** Surfactin protects wheat against *Zymoseptoria tritici* and activates both salicylic acid- and jasmonic acid-dependent defense responses. *Agriculture* 8: 11.
- Li, Y., Héloir, M. C., Zhang, X., Geissler, M., Trouvelot, S. and Jacquens, L. 2019.** Surfactin and fengycin contribute to the protection of a *Bacillus subtilis* strain against grape downy mildew by both direct effect and defence stimulation. *Molecular Plant Pathology* 20: 1037–1050.
- Ma, Z., Hua, G. K. H., Ongena, M. and Hofte, M. 2016.** Role of phenazines and cyclic lipopeptides produced by *Pseudomonas* sp. CMR12a in induced systemic resistance on rice and bean. *Environmental Microbiology Reports* 8: 896–904.
- Ma, Z., Ongena, M. and Hofte, M. 2017.** The cyclic lipopeptide orfamide induces systemic resistance in rice to *Cochliobolus miyabeanus* but not to *Magnaporthe oryzae*. *Plant Cell Reports* 36: 1731–1746.
- Mnif, I., Elleuch, M., Chaabouni, S. E. and Ghribi, D. 2013.** *Bacillus subtilis* SPB1 biosurfactant: Production optimization and insecticidal activity against the carob moth *Ectomyelois ceratoniae*. *Crop Protection* 50: 66–72.
- Montesinos, E. and Bonaterra, A. 2009.** Microbial pesticides. *Encyclopedia of microbiology*, (3rd ed.) Elsevier, New York 110–120.
- Monnier, N., Furlan, A., Botcazon, C., Dahi, A., Mongelard, G. and Cordelier, S. 2018.** Rhamnolipids from *Pseudomonas aeruginosa* are elicitors triggering *Brassica napus* protection against *Botrytis cinerea* without physiological disorders. *Frontiers in Plant Science* 9: 1170.
- Monnier, N., Furlan, A. L., Buchoux, S., Deleu, M., Dauchez, M. and Rippa, S. 2019.** Exploring the dual interaction of natural rhamnolipids with plant and fungal biomimetic plasma membranes through biophysical studies. *International Journal of Molecular Sciences* 20: 1009.
- Monnier, N., Cordier, M., Dahi, A., Santoni, V., Guenin, S. and Clement, C. 2020.** Semi-purified rhamnolipid mixes protect *Brassica napus* against *Leptosphaeria maculans* early infections. *Phytopathology* 110: 834–842.
- Mostafalou, S. and Abdollahi, M. 2013.** Pesticides and human chronic diseases: Evidences, mechanisms, and perspectives. *Toxicology and Applied Pharmacology* 268: 157–177.
- Mukherjee, A. K. and Das, K. 2005.** Correlation between diverse cyclic lipopeptides production and regulation of growth and substrate utilization by *Bacillus subtilis* strains in a particular habitat. *FEMS Microbiology Ecology* 54: 479–489.

- Nielsen, T. H. and Sørensen, J. 2003. Production of cyclic lipopeptides by *Pseudomonas fluorescens* strains in bulk soil and in the sugar beet rhizosphere. *Applied and Environmental Microbiology* 69: 861–868.
- Olorunleke, F. E., Hua, G. K. H., Kieu, N. P., Ma, Z. and Höfte, M. 2015. Interplay between orfamides, sessilins and phenazines in the control of *Rhizoctonia* diseases by *Pseudomonas* sp. *CMR12a. Environmental Microbiology Reports* 7: 774–781.
- Omboye, O. O., Oni, F. E., Batool, H., Yimer, H. Z., De Mot, R. and Höfte, M. 2019. *Pseudomonas* cyclic lipopeptides suppress the rice blast fungus *Magnaporthe oryzae* by induced resistance and direct antagonism. *Frontiers in Plant Science* 10: 901.
- Ongena, M., Jourdan, E., Adam, A., Paquot, M., Brans, A. and Joris, B. 2007. Surfactin and fengycin lipopeptides of *Bacillus subtilis* as elicitors of induced systemic resistance in plants. *Environmental Microbiology* 9: 1084–1090.
- Ongena, M. and Jacques, P. 2008. *Bacillus* lipopeptides: versatile weapons for plant disease biocontrol. *Trends in Microbiology* 16: 115–125.
- Ortiz, A., Teruel, J. A., Espuny, M. J., Marqués, A., Manresa, Á. and Aranda, F. J. 2006. Effects of dirhamnolipid on the structural properties of phosphatidylcholine membranes. *International Journal of Pharmaceutics* 325: 99–107.
- Otzen, D. E. 2017. Biosurfactants and surfactants interacting with membranes and proteins: same but different?. *Biochimica et Biophysica Acta* 1859: 639–649.
- Rabbee, M. F., Ali, M. S., Choi, J., Hwang, B. S., Jeong, S. C. and Baek, K. H. 2019. *Bacillus velezensis*: a valuable member of bioactive molecules within plant microbiomes. *Molecules* 24: 46.
- Radhakrishnan, E. K. and Mathew, J. 2020. Characterization of biosurfactant produced by the endophyte *Burkholderia* sp. WYAT7 and evaluation of its antibacterial and antibiofilm potentials. *Journal of Biotechnology* 313: 1–10.
- Rahman, A., Uddin, W. and Wenner, N. G. 2015. Induced systemic resistance responses in perennial ryegrass against *Magnaporthe oryzae* elicited by semipurified surfactin lipopeptides and live cells of *Bacillus amyloliquefaciens*. *Molecular Plant Pathology* 16: 546–558.
- Revathi, K., Chandrasekaran, R., Thanigaivel, A., Kirubakaran, S. A., Sathish-Narayanan, S. and Senthil-Nathan, S. 2013. Effects of *Bacillus subtilis* metabolites on larval *Aedes aegypti* L. *Pesticide: Biochemistry and Physiology* 107: 369–76.
- Rodríguez, J., Tonelli, M. L., Figueredo, M. S., Ibáñez, F. and Fabra, A. 2018. The lipopeptide surfactin triggers induced systemic resistance and priming state responses in *Arachis hypogaea* L. *European Journal of Plant Pathology* 152: 845–851.
- Romero, D., de Vicente, A., Rakotoaly, R. H., Dufour, S. E., Veening, J. W. and Arrebola, E. 2007. The Iturin and Fengycin families of lipopeptides are key factors in antagonism of *Bacillus subtilis* toward *Podosphaera fusca*. *Molecular Plant-Microbe Interactions* 20: 430–440.
- Sanchez, L., Courteaux, B., Hubert, J., Kauffmann, S., Renault, J. H. and Clément, C. 2012. Rhamnolipids elicit defense responses and induce disease resistance against biotrophic, hemibiotrophic, and necrotrophic pathogens that require different signaling pathways in *Arabidopsis* and highlight a central role for salicylic acid. *Plant Physiology* 160: 1630–1641.
- Sánchez, M., Aranda, F. J., Teruel, J. A., Espuny, M. J., Marqués, A., Manresa, Á. and Ortiz, A. 2010. Permeabilization of biological and artificial membranes by a bacterial dirhamnolipid produced by *Pseudomonas aeruginosa*. *Journal of Colloid and Interface Science* 341: 240–247.
- Savary, S., Willocquet, L., Pethybridge, S. J., Esker, P., McRoberts, N. and Nelson, A. 2019. The global burden of pathogens and pests on major food crops. *Nature Ecology and Evolution* 3: 430–439.
- Schellenberger, R., Touchard, M., Clement, C., Baillieux, F., Cordelier, S., Crouzet, J. and Dorey, S. 2019. Apoplastic invasion patterns triggering plant immunity: plasma membrane sensing at the frontline. *Molecular Plant Pathology* 20: 1602–1616.
- Shalini, D., Benson, A., Gomathi, R., Henry, A. J., Jerritta, S. and Joe, M. M. 2017. Isolation, characterization of glycolipid type biosurfactant from endophytic *Acinetobacter* sp. ACMS25 and evaluation of its biocontrol efficiency against *Xanthomonas oryzae*. *Biocatalysis and Agricultural* 11: 252–258.
- Shekhar, S., Sundaramanickam, A. and Balasubramanian, T. 2015. Biosurfactant Producing Microbes and their Potential Applications: A Review. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology* 45: 1522–54.
- Singh, J. and Yadav, A. N. 2020. *Natural Bioactive Products in Sustainable Agriculture*. Springer, Singapore.

- Snook, M. E., Mitchell, T., Hinton, D. M. and Bacon, C. W. 2009.** Isolation and characterization of Leu7-surfactin from the endophytic bacterium *Bacillus mojavensis* RRC 101, a biocontrol agent for *Fusarium verticillioides*. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 57: 4287–4292.
- Stanghellini, M. E. and Miller, R. M. 1997.** Biosurfactants: their identity and potential efficacy in the biological control of zoosporic plant pathogen. *Plant Disease* 81: 4–12.
- Syed, A. B., Rahman, S. F., Singh, E., Pieterse, C. M. J. and Schenk, P. M. 2018.** Emerging microbial biocontrol strategies for plant pathogens. *Plant Science* 267: 102–111.
- Tran, H., Ficke, A., Asiimwe, T., Hofte, M. and Raaijmakers, J. M. 2007.** Role of the cyclic lipopeptide massetolide A in biological control of *Phytophthora infestans* and in colonization of tomato plants by *Pseudomonas fluorescens*. *New Phytologist* 175: 731–742.
- Varnier, A. L., Sanchez, L., Vatsa, P., Boudesocque, L., Garcia-Brugger, A. and Rabenoelina, F. 2009.** Bacterial rhamnolipids are novel MAMPs conferring resistance to *Botrytis cinerea* in grapevine. *Plant, Cell and Environment* 32: 178–193.
- Velho, R. V., Medina, L. F., Segalin, J. and Brandelli, A. 2011.** Production of lipopeptides among *Bacillus* strains showing growth inhibition of phytopathogenic fungi. *Folia Microbiologica (Praha)* 56: 297–303.
- Vijayakuma, S. and Varatharajan, S. 2015.** Biosurfactants-Types, Sources and Applications. *Research Journal of Microbiology* 10: 181–192.
- Waewthongrak, W., Leelasuphakul, W. and McCollum, G. 2014.** Cyclic lipopeptides from *Bacillus subtilis* ABS-S14 elicit defense-related gene expression in citrus fruit. *PLoS One* 9, e109386.
- Wu, L., Huang, Z., Li, X., Ma, L., Gu, Q. and Wu, H. 2018.** Stomatal closure and SA-, JA/ET-signaling pathways are essential for *Bacillus amyloliquefaciens* FZB42 to restrict leaf disease caused by *Phytophthora nicotianae* in *Nicotiana benthamiana*. *Frontiers in Microbiology* 9: 847.
- Yadav, A. N., Verma, P., Kour, D., Rana, K. L., Kumar, V. and Singh, B. 2017.** Plant microbiomes and its beneficial multifunctional plant growth promoting attributes. *International Journal of Environmental* 3: 1–8.
- Yamamoto, S., Shiraishi, S. and Suzuki, S. 2015.** Are cyclic lipopeptides produced by *Bacillus amyloliquefaciens* S13-3 responsible for the plant defence response in strawberry against *Colletotrichum gloeosporioides*? *Letters in Applied Microbiology* 60: 379–386.
- Yang, S. Y., Lim, D. J., Noh, M. Y., Kim, J. C., Kim, Y. C. and Kim, I. S. 2017.** Characterization of biosurfactants as insecticidal metabolites produced by *Bacillus subtilis* Y9. *Entomological Research* 47: 55–59.
- Yoo, D. S., Lee, B. S. and Kim, E. K. 2005.** Characteristics of microbial biosurfactant as an antifungal agent against plant pathogenic fungus. *Journal of Microbiology and Biotechnology* 15: 1164–1169.
- Yun, D. C., Yang, S. Y., Kim, Y. C., Kim, I. S., Kim and Y. H. 2013.** Identification of surfactin as an aphicidal metabolite produced by *Bacillus amyloliquefaciens* G1. *Journal of the Korean Society for Applied Biological Chemistry* 56: 751–753.

Biosurfactants: Environmentally friendly pesticides

N. Fazaeli¹, N. Bahador^{2*} and Sh. Hesami³

Received: 2 Dec., 2022

Accepted: 6 Mar., 2023

ABSTRACT

Biosurfactants are amphiphilic surface active molecules that are produced by microorganisms such as the bacteria, fungi, and yeasts. Nowadays, these compounds are highly regarded in pest management due to their low toxicity, biological decomposition, optimal activity in harsh environmental conditions and environment-friendly nature. Recently, the insecticidal activity of biosurfactants obtained from different bacterial species has been reported. Therefore, considering the role of biosurfactants in the production of new insecticides and the environmental management of pests, in this paper, the use of biosurfactants in controlling agricultural pests and the direct antimicrobial activities of these compounds against plant pathogens have been investigated. Also, how the immune system of plants is stimulated by rhamnolipids and lipopeptides, which leads to plant resistance against plant pathogens, has been investigated. So that further research in this field can lead to the replacement of these biological pesticides instead of synthetic ones, and in the future, the effects of these pesticides on pests' histology and the optimization of their production can be studied.

Key words: Biosurfactant, Biological pesticide, Plant pathogen, Rhamnolipid, Lipopeptide

1 and 2. Instructor and Associated professor, respectively, Department of Microbiology, College of Science, Agriculture and Modern Technology, Shiraz Branch, Islamic Azad University, Shiraz, Iran

3. Associated professor, Department of Entomology, College of Science, Agriculture and Modern Technology, Shiraz Branch, Islamic Azad University, Shiraz, Iran

Corresponding author: bahador@iaushiraz.ac.ir

doi: 10.30495/plant.2023.705211