

کد مقاله: agconf-744929

کاربرد فسفیت (PO_3^{3-}) در تغذیه گیاهان زراعی و مدیریت علف های هرز

محمد اسماعیل پور^{۱*}، حمید محمدی^۲

۱- استادیار گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه جهرم، جهرم، ۲- دانشیار گروه اکوفیزیولوژی گیاهان زراعی

و دارویی، دانشگاه شهید مدنی آذربایجان، تبریز

* emailpour@jahromu.ac.ir

چکیده

با توجه به تبعات زیست محیطی مصرف گسترده ی علفکش ها و بروز مقاومت های چندگانه در علفهای هرز، نیاز است به دنبال راهکارهایی برای جایگزینی علفکش ها بود. فسفیت که فرم احیا شده ی فسفات است توسط هیچ گیاهی قابل استفاده نیست و در صورت پاشش فسفیت، رشد تمام گیاهان به شدت کاهش می یابد. در گونه ای باکتری، آنزیمی به نام فسفیت دهیدروژناز (ptxD) وجود دارد که می تواند فسفیت را به فسفات تبدیل کند. با انتقال ژن فسفیت دهیدروژناز به گیاهان زراعی، آنها قادر به تبدیل فسفیت به فسفات و استفاده از فسفیت بعنوان منبع فسفر می شوند. لذا با کشت این گیاهان دستکاری شده و پاشش فسفیت، می توان رشد کلیه ی علف های هرز باریک و پهن برگ را سرکوب کرد. بر خلاف کودهای شیمیایی فسفات، آبشویی فسفیت از مزارع سبب خفگی تالاب ها به علت رشد انفجاری جلبک ها نخواهد شد چرا که جلبک ها نیز قادر به استفاده از فسفیت بعنوان منبع فسفر نیستند. سیستم انتقال ژن ptxD به گیاهان زراعی و محلول پاشی فسفیت، می تواند به حل بسیاری از مشکلات حوزه های کشاورزی، بیوتکنولوژی و زیست محیطی که در حال حاضر با آنها مواجه هستیم، کمک کند.

کلمات کلیدی: آبشویی، فسفیت دهیدروژناز، مقاومت به علفکش، ریزجلبکها

مقدمه

با توجه به افزایش جمعیت بشر که پیش بینی می شود تا سال ۲۰۵۰ به بیش از ۹ میلیارد نفر برسد، افزایش تولید محصولات کشاورزی در دنیا به منظور جلوگیری یا به تعویق انداختن بحران غذایی جهانی ضرورتی انکار ناپذیر است. با توجه به از دست رفتن هرساله ی سطح قابل توجهی از اراضی کشاورزی در دنیا به دلیل خشکسالی، شور شدن خاک، توسعه شهرها و تغییر کاربری اراضی کشاورزی، راهکار اصلی برای افزایش محصولات کشاورزی در دنیا، افزایش تولید در واحد سطح و استفاده بهینه از اراضی موجود است. از جمله عوامل مهم کاهش دهنده عملکرد محصولات زراعی، حضور علفهای هرز در اراضی کشاورزی می باشد که در صورت عدم کنترل آنها بسته به نوع محصول ممکن است تا ۱۰۰ درصد سبب کاهش عملکرد گردد. در حال حاضر، رایج ترین، راحت ترین و گسترده ترین روش مبارزه با علف های هرز در سطح جهانی، استفاده از انواع علفکش ها است. با این حال در اثر استفاده گسترده از علف کش ها طی دهه های اخیر مشکلات متعددی نیز ظهور پیدا کرده و هر ساله در حال تشدید است. بعنوان مثال بیوتیپ هایی از علفهای هرز در



اراضی کشاورزی ظاهر شده اند که به برخی از علفکش ها مقاوم شده اند و با پاشش هرچه بیشتر علفکش ها نیز از بین نمی روند. از طرف دیگر، در بیش از سه دهه ی گذشته، علفکش با مکانیزم عمل جدیدی اختراع و بصورت تجاری وارد بازار نشده و هزینه کشف این نوع علفکش ها برای شرکت های مربوطه نیز بسیار بالا رفته است [۱]. گزارشات متعددی نیز هر ساله در خصوص عوارض زیست محیطی و اثرات منفی مصرف علفکش ها بر سلامتی انسان منتشر می شود. بنابراین باید به دنبال راهکارهای جدید برای حذف علفهای هرز در سطح وسیع بود و در این زمینه نیز راهکارهای محدود و انگشت شماری و در عین حال با کارایی بالا برای کاهش وابستگی به علفکش ها در حذف علف های هرز وجود دارد.

با توجه به اینکه یون فسفیت (PO_3^{3-}) (با حروف اختصاری Phi)، ترکیبی سمی برای گیاهان و از جمله علف های هرز محسوب می شود، لذا یکی از این راهکارها استفاده از محلول پاشی فسفیت در مزرعه برای حذف علف های هرز در سطح وسیع است. با دستورزی ژنتیکی گیاهان زراعی با هدف ایجاد توانایی آنها در استفاده از فسفیت، نه تنها از آسیب آن در امان خواهند بود بلکه از فسفیت به عنوان منبع عنصر فسفر نیز استفاده خواهند کرد. با کشت این گونه گیاهان زراعی مخصوصاً در خاکهای با فسفات (HPO_4^{2-}) کم و با محلول پاشی فسفیت، تمام علف های هرز بخاطر سمیت فسفیت و همچنین کمبود دسترسی به فسفات از بین خواهند رفت درحالی که عملکرد گیاه زراعی به علت سرکوب رشد علفهای هرز و دسترسی کافی به فسفر افزایش خواهد یافت [۲]. در ادامه به چالش ها و محدودیت های استفاده رایج و گسترده امروزی از فسفات به عنوان منبع فسفر برای تغذیه گیاهان پرداخته خواهد شد تا ابتدا ظرفیت و ضرورت و مزایای استفاده از فسفیت جهت جایگزینی با فسفات در تغذیه گیاه روشن و برجسته شود. سپس فرصت ها و چالش های کاربرد فسفیت با هدف دوگانه ی تغذیه ای و کنترلی علفهای هرز مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

وابستگی کشاورزی به معادن فسفات و چالش های آن

فسفر از جمله مهمترین عناصر درشت مغذی است که برای رشد تمام موجودات زنده و از جمله گیاهان ضروری بوده و حدود ۰/۲ درصد از وزن خشک گیاهان را تشکیل می دهد و بخش از ساختار DNA، RNA، فسفوپروتئین ها، فسفولیپیدها، کربوفسفات ها، آنزیم ها و ترکیبات فسفردار پر انرژی نظیر ATP و $NADP(H)$ است و وظایف فیزیولوژیکی متعددی در سلول گیاهی از جمله پیام رسانی های سلولی از طریق فسفره و دفسفره شدن پروتئین ها و فعال سازی ژن ها دارد. تمام گیاهان فسفر را فقط به فرم فسفات می توانند جذب و مصرف کنند و فسفات نیز از ذخایر معدن فسفات که مقدار آن در طبیعت محدود هست، تأمین می شود. پراکندگی ذخایر فسفات در دنیا نیز یکسان نیست بطوری که بیش از دو سوم ذخایر جهانی سنگ فسفات در چین، مراکش و غرب صحرای sahara قرار دارند [۳]. به همین خاطر اغلب کشورها مجبورند فسفر مورد نیاز خود را از طریق واردات تأمین کنند. از پایان جنگ جهانی دوم تاکنون، میزان استخراج سنگ معدن فسفات سه برابر شده تا تقاضای جهانی برای کشاورزی و صنعت پوشش داده شود. کشاورزی امروزی وابسته به تأمین مداوم کودهای فسفاته است تا فسفرهای خارج شده از خاک مزرعه طی برداشت محصول را جایگزین کند. منو دی آمونیوم فسفات، NPK، سوپرفسفات ساده، سوپرفسفات تریپل و سنگ فسفات اصلی ترین فرم های کودهای فسفاته مورد استفاده در کشاورزی هستند. کمبود جزئی فسفر منجر به کاهش عملکرد محصولات



زراعی می شود. لذا برای بهبود حاصلخیزی خاک و افزایش عملکرد محصول، سالانه میلیون ها تن کودهای فسفاته در مزارع مصرف می شود. برخلاف کودهای شیمیایی نیتروژنه که بطور مصنوعی در کارخانجات پتروشیمی ساخته می شوند، منابع فسفر تجدید پذیر نیستند و ذخایر جهانی فسفات به علت سرعت بالای مصرف سریعاً در حال کاهش است. تقریباً ۸۰ درصد از ذخایر معدنی فسفات برای تولید کودهای فسفات دار استفاده می شود و در صورت تداوم مصرف با سرعت کنونی، تخمین زده می شود ۷۰ تا ۲۰۰ سال آینده ذخایر معدنی فسفات به اتمام می رسند [۴]. دسترسی ریشه گیاهان به فسفات بوسیله ی دو عامل محدود می شود: اول اینکه فسفات گونه ای شدیداً واکنش دهنده است و سریعاً با کاتیون های خاک نظیر آهن، کلسیم و منیزیم واکنش می دهد و برای ریشه گیاه غیرقابل جذب می شود. دوم اینکه باکتری ها و سایر فلور میکروبی خاک، سریعاً ارتوفسفات خاک را جذب کرده و در ترکیبات آلی درون پیکره ی خود بکار می برند که در نتیجه ی آن، ریشه گیاه قادر به جذب ارتوفسفات نخواهد بود. در حقیقت فقط ۲۰ تا ۳۰ درصد از کودهای فسفاته که در اراضی کشاورزی استفاده می شوند، توسط گیاهان کاشته شده در مزرعه مصرف می شوند و ۷۰ تا ۸۰ درصد به فرم های غیر قابل دسترس گیاه تبدیل می شوند. در نتیجه، کاربرد بیش از حد کودهای فسفره توسط کشاورزان به امری رایج در مزارع در سطح جهان تبدیل شده که این موضوع نه تنها هزینه تولید را بالا می برد و منجر به تسریع در اتمام ذخایر فسفات و کمبود فسفر و افزایش هرچه بیشتر قیمت جهانی آن در آینده نزدیک می شود بلکه باعث تضعیف سلامتی خاک و همچنین خفگی^۱ دریاچه ها و اقیانوس ها می گردد. افزایش جمعیت بشر و نیاز بیشتر به فسفات، نگرانی ها را درباره پایداری تولیدات کشاورزی در آینده را افزایش داده است. این موضوع لزوم یافتن تکنولوژی هایی برای مصرف اقتصادی و کارآمد فسفر در کشاورزی را دوچندان کرده است.

پتانسیل های کاربرد فسفیت در تغذیه گیاهان و مدیریت علف های هرز

برعکس فسفات، معادن فسفیت به میزان بیشتری در طبیعت وجود دارند. فسفیت در سال ۱۹۹۷ توسط سازمان حفاظت محیط زیست آمریکا برای استفاده بعنوان قارچ کش در اراضی بسیاری از محصولات زراعی و غیر زراعی مورد تأیید قرار گرفته است چراکه از طریق ممانعت از رشد اوومایست ها از سرایت بیماری ناشی از گونه های Phythophthora جلوگیری می کند و برای انسان ها و حیوانات نیز هیچ خطری ندارد. فسفیت فرم احیا شده ی فسفات است که در آن یک اتم اکسیژن با یک اتم هیدروژن جایگزین شده است. این جایگزینی، بر رفتار این ترکیب در موجودات زنده تأثیر گذاشته است. در فسفات، اتم فسفر در مرکز یک چهار وجهی قرار گرفته و سه اتم اکسیژن و یک مولکول OH در چهار بازوی آن قرار گرفته اند. ساختار فسفات بخاطر توزیع یکنواخت بار در یون فسفات کاملاً متقارن است. در فسفیت نیز فسفات در مرکز یک چهار وجهی قرار گرفته اما این مولکول تقارن کامل ندارد که این موضوع فعالیت بیولوژیکی آن را تغییر داده است. به نظر می رسد در واکنش های بیوشیمیایی آنزیمی در موجودات زنده، بخشی از آنزیم که فسفات به آن متصل می شود، سه اتم از چهار اتم اکسیژن را تشخیص داده و در برمی گیرند و اکسیژن چهارم بیرون از سطح آنزیم

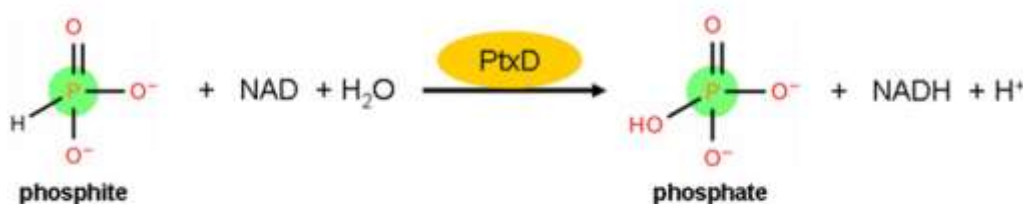
^۱ - Eutrophication

قرار می گیرد تا برای مشارکت در واکنش های آنزیمی در دسترس باشد. لذا فسفیت نمی تواند در چنین واکنش های بیوشیمیایی مشارکت کند چرا که به جای اکسیژن، اتم هیدروژن آن بیرون از سطح آنزیم قرار می گیرد (شکل ۱). بنابراین آنزیم های دخیل در واکنش های انتقال فسفریل می توانند به راحتی فسفات و فسفیت را از هم تشخیص دهند. در برخی از گیاهان و مخمرها فسفیت توسط ناقل فسفات و همچنین سیستم حسگری فسفات در سلول بعنوان فسفات تشخیص داده می شود. علاوه بر این فسفیت بطور کلی مخصوصاً در شرایط کمبود فسفر در گیاه، بعنوان یک ترکیب سمی برای گیاهان شناخته می شود که در غلظتهای بالا رشد گیاه را بازداری می کند. بعنوان مثال با کاربرد فسفیت به میزان ۲۴ کیلوگرم در هکتار، رشد ریشه و شاخساره گیاه کاهش پیدا می کند. لذا استفاده از آن بعنوان یک ترکیب در نقش علفکش عمومی با طیف عمل وسیع برای مدیریت علفهای هرز توسط محققان مورد پیشنهاد قرار گرفته است [۵].



شکل ۱: ساختار مولکول های فسفات و فسفیت [۶]

سویه های معدودی از باکتری وجود دارند که قادرند فسفیت را از طریق اکسید کردن به ارتوفسفات تبدیل کنند. در باکتری *Pseudomonas stutzeri* WM88، ژن *ptxD*، آنزیم فسفیت اکسیدوریداکتاز اختصاصی را کد می کند که می تواند با استفاده از NAD^+ بعنوان کوفاکتور، فسفیت را اکسید کرده و ارتوفسفات و NADH را بعنوان محصول تولید کند (شکل ۲) [۷ و ۲]. محصولات این واکنش آنزیمی یعنی ارتوفسفات و NADH بی خطر بوده و ترکیباتی هستند که در تمام سلول های زنده بطور طبیعی وجود دارند. برای بررسی اینکه مسیر تبدیل فسفیت به فسفات می تواند در گیاهان مهندسی شود، تحقیقات زیادی در خصوص انتقال ژن *ptxD* به گیاهان مختلف از جمله آرابیدوپسیس، تنباکو، برنج، پنبه و غیره انجام شده است. در یک تحقیق بعد از پاشش فسفیت بر روی بوته های توتون، میزان فسفیت در برگها، گلها و میوه های گیاه دارای ژن فسفیت دهیدروژناز اندازه گیری شد و مقدار فسفیت در اندام های آن بسیار ناچیز (کمتر از ۰/۱ نانومول بر گرم) بود که نشان می دهد تقریباً تمام فسفیت ها در پیکره گیاه به ارتوفسفات تبدیل شده اند [۲]. این گیاهان توانستند به خوبی از فسفیت بعنوان منبع فسفر استفاده کنند درحالی که رشد گیاهان شاهد در حضور فسفیت بازداری شد.



شکل ۲: واکنش تبدیل فسفیت به فسفات توسط آنزیم فسفیت دهیدروژناز [۸]



برای بررسی امکان استفاده از سیستم فسفیت/ptxD (یعنی انتقال ژن فسفیت دهیدروژناز به گیاه زراعی و محلول پاشی فسفیت) برای کنترل علف های هرز، آزمایشی در اتاقک رشد و گلخانه با استفاده از پنبه ی دارای ژن ptxD در رقابت با علف های هرز مختلف از جمله یک بیوتیپ علف هرز شدیداً مقاوم به گلايفوزیت (*Amaranthus palmeri*) که عملکرد مزرعه پنبه را به شدت کاهش می داد اجرا شد [۹]. بوته های پنبه ی دارای ژن ptxD، تحت تأثیر پاشش فسفیت قرار نگرفتند چرا که با اکسیداسیون فسفیت به فسفات، نه تنها سمیت فسفیت مرتفع شده بلکه فسفر مورد نیاز سلولهایشان نیز تأمین شده است. در تیمار فسفیت، خسارت زیادی به برگهای تمام علفهای هرز وارد شد و رشد آنها شدیداً کاهش یافت. بنابراین درحالی که فسفیت یک علفکش نیست، اما به گونه ای عمل می کند که بطور انتخابی رشد محصول دلخواه را افزایش داده و درعین حال رشد انواع علفهای هرز باریک و پهن برگ را سرکوب می کند. زمانی که محصول زراعی در رقابت با علف هرز پیروز شد، سایه دهی بر روی علف هرز نیز احتمالاً رشد علف هرز را بیش از پیش کاهش می دهد.

با توجه به اینکه برخی از علف های هرز می توانند علفکش ها را از طریق کده بندی آن در قسمتهای درون سلولی و یا ممانعت از جذب آن بی اثر کنند و یا با وقوع جهش ژنی نسبت به یک یا چند علفکش مقاومت نشان دهند. لذا در صورت ایجاد جهش در علف های هرز، کارایی کاربرد کود فسفیت در سطح وسیع زیر سوال می رود. با این حال، احتمال بسیار کمی وجود دارد که علف های هرز بتوانند مقاومت به فسفیت را در خود ایجاد کنند چرا که تنها راهی که علفهای هرز می توانند بواسطه ی آن از تهدید فسفیت در شرایط کمبود فسفر در امان باشند، بدست آوردن توانایی اکسید کردن فسفیت به فسفات است. این توانایی نیز مستلزم ایجاد فعالیت آنزیمی جدید در گیاه از طریق وقوع جهش های چندگانه و بسیار زیاد است. از طرف دیگر از آنجا که فسفیت بطور طبیعی در خاکها وجود ندارد، فرار ژنی از تراریخته های ptxD به گونه های وحشی، باعث ظهور علفهای هرز جدید واجد ژن ptxD در خارج از سیستم های کشاورزی و خاکهایی که میزان فسفات کمی دارد نمی گردد.

بنابراین سیستم فسفیت/ ptxD جایگزین بسیار قوی برای تولید محصولات با استفاده از ترکیبات شیمیایی غیر سمی است. این سیستم علاوه بر اینکه یک استراتژی بسیار امیدوار کننده در سرکوب علف های هرز است، مقادیر کمتر کودهای فسفره نیز در صورتی که از فسفیت بجای فسفات در این نوع کودها استفاده شود، برای حصول به عملکرد مطلوب گیاه زراعی قادر به متابولیسم فسفات مورد نیاز خواهد بود [۲]. این موضوع به دلایل مختلف از جمله کمتر بودن تثبیت فسفیت در خاک در مقایسه با فسفات و همچنین این واقعیت که میکروارگانیسم های معدودی قادر به استفاده از فسفیت بعنوان منبع فسفر هستند می باشد [۱۰]. با این حال ممکن است جمعیت معدود باکتری های خاکری که قادرند از فسفیت استفاده کنند به علت استفاده مکرر از فسفیت بعنوان کود در خاک زیاد شود که این موضوع می تواند کارایی این تکنولوژی را کاهش دهد. راهکار برای ممانعت از بروز این مشکل احتمالی، کاربرد فسفیت بصورت محلول پاشی برگی بجای کاربرد آن در خاک می باشد که در این صورت احتمال ناکارآمدی این تکنولوژی در حذف علفهای هرز و تغذیه گیاه در بلند مدت کاهش یافته یا حداقل به تأخیر انداخته می شود.



اگرچه غالب میکروارگانیزم ها از جمله ریزجلبکها، قادر به متابولیسم فسفیت نیستند، اما فسفیت برای این میکروارگانیزمها ترکیبی سمی نیست [۱۱]. بنابراین کاربرد فسفیت در مزرعه بطورکلی تغییر اساسی در جمعیت میکروبی خاک ایجاد نمی کند. درحقیقت حلالیت بالاتر فسفیت و همزمان تمایل کمتر آن برای اتصال به اجزای خاک، زمانی که به منظور ممانعت از آبشویی در فرمولاسیون مناسبی بکار برده شود، منجر به کاهش مصرف کود فسفره بدون داشتن اثر منفی بر عملکرد محصول می گردد. حتی اگر مقداری از فسفیت از اراضی زراعی به دریاچه ها یا تالابها برسد، انواع گونه های جلبک قادر به استفاده از آن بعنوان منبع فسفر نیستند و لذا منجر به رشد انفجاری جلبک ها در تالاب ها که از عوارض معمول استفاده از کودهای دارای فسفات است، نخواهد شد [۱۱]. غنی شدن رواناب ها از عناصر معدنی و رشد انفجاری جلبک های سمی سبب ایجاد بیش از ۴۰۰ ناحیه ی مرده در نقاط مختلف اقیانوس ها شده که سطحی معادل بیش از ۲۵۰ هزار کیلومتر مربع از اقیانوس ها را در بر گرفته است. بنابراین کاربرد سیستم فسفیت/ptxD به علت کاهش یوتریفیکاسیون آب و خفگی ناشی از ورود کودهای فسفات و نیتروژنه ی رواناب ها به تالاب ها، مزایای اکولوژیکی بسیار مهمی نیز دارد. این سیستم نه تنها به ما کمک می کند که علفهای هرز حتی آنهایی که مقاوم به علفکش شده اند را به خوبی مدیریت کنیم، بلکه رشد انفجاری جلبک ها در دریاچه ها و اقیانوس ها را نیز کاهش می دهد [۸].

نتیجه گیری

از مزایای کاربرد سیستم فسفیت/ptxD این است که با یک بار پاشش فسفیت هم کوددهی انجام می شود و هم علف های هرز کنترل می شوند. همچنین فسفیت می تواند بعنوان عامل کنترل کننده علفهای هرز قبل و بعد از کاشت به ترتیب از طریق مصرف در خاک و یا محلول پاشی برگی مطرح باشد. از طرف دیگر، آبشویی فسفیت از مزارع، برخلاف فسفات که حتی در حد غلظت های میکرومولار آن منجر به رشد انفجاری جلبک ها و در نتیجه مصرف شدید اکسیژن در رودخانه ها، دریاها و اقیانوس ها و مرگ سایر موجودات از جمله ماهی ها می گردد، تقریباً اثر منفی بر جلبک ها یا سایر موجودات آبی و بطورکلی تنوع زیستی اکوسیستم های آبی ندارد. بطور خلاصه، تولید گیاهان ترانسژنیک که قادر به استفاده از فسفیت هستند همراه با کاربرد فسفیت بعنوان منبع فسفر، می تواند پروژه کود دهی فسفری و کنترل علف هرز موثری در بسیاری از اراضی کشاورزی مخصوصاً اراضی با میزان فسفات پایین باشد. با این حال در کشت گیاهان ترانسژنیک در اراضی که باقی مانده ی فسفات در آنها وجود دارد، لازم است تا چند سال کودهای فسفات داده نشود تا خاک از فسفات تخلیه گردد و در طی این دوره ی گذار در کنار محلول پاشی فسفیت، در صورت نیاز از علفکش های اختصاصی برای کنترل موثر علفهای هرز استفاده شود. همچنین لازم است اثرات کاربرد طولانی مدت فسفیت بعنوان منبع فسفر بر روی میکروفلور خاک تحت شرایط مزرعه مورد بررسی قرار گیرد. همچنین برای ارزیابی کاربرد تجاری فسفیت بایستی آزمایشات مزرعه ای در چندین مکان دارای خاکهای مختلف انجام شود و در این آزمایشات به دقت مقدار آبشویی فسفیت در مقایسه با فسفات و همچنین تبعات مثبت یا منفی آن مورد بررسی و ارزیابی دقیق قرار گیرد. بطور کلی، سیستم فسفیت/ptxD یکی از امیدوارکننده ترین تکنولوژی های سالهای اخیر است



که می تواند به حل بسیاری از مشکلات حوزه های کشاورزی، بیوتکنولوژی و زیست محیطی که در حال حاضر با آنها مواجه هستیم، کمک کند.

منابع

- [1]- Dayan, F.E., 2019. Current status and future prospects in herbicide discovery. *Plants*, 8(9), p.341.
- [2]- López-Arredondo, D.L. and Herrera-Estrella, L., 2012. Engineering phosphorus metabolism in plants to produce a dual fertilization and weed control system. *Nature biotechnology*, 30(9), pp.889-893.
- [3]- Smit, A.L., Bindraban, P.S., Schröder, J.J., Conijn, J.G. and Van der Meer, H.G., 2009. *Phosphorus in agriculture: global resources, trends and developments: report to the Steering Committee Technology Assessment of the Ministry of Agriculture, Nature and Food Quality, The Netherlands, and in collaboration with the Nutrient Flow Task Group (NFTG), supported by DPRN (Development Policy review Network) (No. 282)*. Plant Research International.
- [4]- Dawson, C.J. and Hilton, J., 2011. Fertiliser availability in a resource-limited world: Production and recycling of nitrogen and phosphorus. *Food Policy*, 36, pp.S14-S22.
- [5]- McDonald, A.E., Grant, B.R. and Plaxton, W.C., 2001. Phosphite (phosphorous acid): its relevance in the environment and agriculture and influence on plant phosphate starvation response. *Journal of plant nutrition*, 24(10), pp.1505-1519.
- [6]- Havlin, J.L. and Schlegel, A.J., 2021. Review of phosphite as a plant nutrient and fungicide. *soil systems*, 5(3), p.52.
- [7]- Costas, A.M.G., White, A.K. and Metcalf, W.W., 2001. Purification and Characterization of a Novel Phosphorus-oxidizing Enzyme from *Pseudomonas stutzeri* WM88* 210. *Journal of Biological Chemistry*, 276(20), pp.17429-17436.
- [8]- Achary, V.M.M., Ram, B., Manna, M., Datta, D., Bhatt, A., Reddy, M.K. and Agrawal, P.K., 2017. Phosphite: a novel P fertilizer for weed management and pathogen control. *Plant Biotechnology Journal*, 15(12), pp.1493-1508.
- [9]- Pandeya, D., López-Arredondo, D.L., Janga, M.R., Campbell, L.M., Estrella-Hernández, P., Bagavathiannan, M.V., Herrera-Estrella, L. and Rathore, K.S., 2018. Selective fertilization with phosphite allows unhindered growth of cotton plants expressing the ptxD gene while suppressing weeds. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 115(29), pp.E6946-E6955.
- [10]- Heuer, S., Gaxiola, R., Schilling, R., Herrera- Estrella, L., López- Arredondo, D., Wissuwa, M., Delhaize, E. and Rouached, H., 2017. Improving phosphorus use efficiency: a complex trait with emerging opportunities. *The Plant Journal*, 90(5), pp.868-885.
- [11]- Loera- Quezada, M.M., Leyva- González, M.A., Velázquez- Juárez, G., Sanchez- Calderón, L., Do Nascimento, M., López- Arredondo, D. and Herrera- Estrella, L., 2016. A novel genetic engineering platform for the effective management of biological contaminants for the production of microalgae. *Plant biotechnology journal*, 14(10), pp.2066-2076.