

اثر مهار پروتئین‌های مهارکننده پلی گالاتوروناز لوبیا بر آنزیم پلی گالاتوروناز قارچ‌های بیماری‌زای *Fusarium oxysporum* و *Ascochyta rabiei* گیاه نخود

اباصلت حسین زاده کلاگر^۱، علی مصطفایی^۲، مصطفی مطلبی^۳ و محمدرضا زمانی^۳

چکیده

قارچ‌های بیماری‌زا به منظور نفوذ به بافت گیاهی از آنزیم‌های پلی گالاتورونازی استفاده می‌کنند. در مقابل، برخی از گیاهان واجد پروتئین‌های مهارکننده پلی گالاتوروناز (Polygalacturonase-Inhibiting Proteins/ PGIP) می‌باشند که عملکرد این گلیکو پروتئین‌ها به تأخیر انداختن نفوذ هیف آن و در نتیجه عدم کلونیزاسیون قارچی می‌باشد. در این تحقیق PGIP از هیپوکتیل وارپته‌های درخشان و ناز لوبیا (*Phaseolus vulgaris*) استخراج شد. سپس به روش کروماتوگرافی جذبی با استفاده از آنزیم پلی گالاتوروناز به‌عنوان لیگاند اختصاصی، تخلیص گردید. خلوص محصول با روش SDS-PAGE مورد بررسی قرار گرفت و مشخص شد که حاوی سه باند پروتئینی در محدوده ۴۷-۴۵ کیلو دالتونی بود. نتایج خالص‌سازی نشان داد که محصول به‌دست آمده از کروماتوگرافی جذبی از خلوص نسبتاً بالایی برخوردار می‌باشد. هم‌چنین بازده خالص‌سازی PGIP با استفاده از کروماتوگرافی جذبی به میزان ۱/۶۸ میلی‌گرم PGIP به ازای ۱۰۰ گرم هیپوکتیل تازه لوبیا می‌باشد. اثر مهار پروتئین‌های تخلیص شده بر آنزیم پلی گالاتوروناز جدایه‌های بیماری‌زای *Fusarium oxysporum* (جدایه F15) و *Ascochyta rabiei* (جدایه IK04) بررسی شد. پروتئین‌های استخراج شده از هیپوکتیل وارپته‌های ناز و درخشان قبل از خالص‌سازی به ترتیب معادل ۱۸ و ۲۸ واحد فعالیت مهارکنندگی بر آنزیم پلی گالاتوروناز قارچ *Fusarium oxysporum* از خود نشان می‌دادند در صورتی که این میزان مهارکنندگی پس از خالص‌سازی، هر کدام به ۴۰ واحد افزایش یافت. هم‌چنین فعالیت مهارکنندگی PGIP از این دو وارپته بر آنزیم پلی گالاتوروناز قارچ *Ascochyta rabiei* قبل از خالص‌سازی هر کدام به میزان ۹ واحد بوده و پس از خالص‌سازی این میزان مهارکنندگی به ترتیب به ۱۸ و ۲۹ واحد افزایش می‌یابد.

واژه‌های کلیدی: پروتئین مهارکننده آنزیم پلی گالاتوروناز، لوبیا (*Phaseolus vulgaris*)، کروماتوگرافی جذبی، *Ascochyta rabiei*، *Fusarium oxysporum*

مقدمه

پلی ساکاریدهای پکتینی جزء مهم دیواره اولیه دولپه‌ای‌ها (۱۳)، ۱۸ و ۲۲) و برخی از تک لپه‌ای‌ها (۱۷) می‌باشند در حالی که بخش عمده‌ای از لایه میانی را نیز تشکیل می‌دهند. برخی از

دیواره سلول گیاهی با داشتن ساختار پایدار، اولین سد دفاعی در مقابل پاتوژن‌ها است. از میان ترکیبات سازنده این دیواره،

۱. دانشجوی سابق دکتری بیولوژی، دانشکده علوم، دانشگاه رازی کرمانشاه و در حال حاضر استادیار بیولوژی، دانشکده علوم، دانشگاه مازندران، بابلسر

۲. دانشیار مرکز تحقیقات بیولوژی پزشکی، دانشگاه علوم پزشکی کرمانشاه

۳. استادان پژوهشگاه ملی مهندسی ژنتیک و زیست فناوری، تهران

همراه با تغییراتی به شرح زیر اندازه‌گیری گردید. بدین منظور ۴۰ میکرولیتر از محلول آنزیمی به ۲۱۰ میکرولیتر از سوپسترای ۰/۲۴ درصد (w/v) پلی گالاکتورونیک اسید با $\text{pH} = 5/3$ (محلول در ۰/۱۲ مولار کلرید سدیم، ۶۰ میلی مولار استات سدیم و ۶ میلی مولار اتانل دی آمین ترا استیک اسید) اضافه شد. مخلوط به مدت ۲۰ دقیقه در دمای ۳۷ درجه سانتی‌گراد قرار داده شد و بعد از متوقف نمودن واکنش با استفاده از معرف مس و حرارت، جذب نوری محلول سانتریفیوژ شده که حاوی گروه‌های احیایی در حضور معرف آرسنو مولیبدات می‌باشد در طول موج ۵۰۰ نانومتر (اسپکتروفوتومتر شیماتزو مدل UV-1201 خوانده شد. در این روش از محلول مونومری D-گالاکتورونیک اسید با غلظت‌های مختلف به‌عنوان استاندارد استفاده شد. بنابه تعریف، یک واحد آنزیم پلی گالاکتوروناز مقدار آنزیمی است که یک میکرومول از D-گالاکتورونیک اسید (گروه‌های احیایی) را در مدت یک دقیقه تحت این شرایط تولید نماید (۱۱).

شرایط کاشت واریته‌های لوبیا و استخراج پروتئین‌های گیاهی
بذرهای پس از ضد عفونی با آب ژاول ۰/۰۵ درصد، در خاک سترون شده و در دوره نوری ۱۵ ساعته (با دمای ۳۳ درجه سانتی‌گراد) و تاریکی (با دمای ۱۵ درجه سانتی‌گراد) براساس روش سرونی و همکاران (۷) کشت شدند. سپس بر اساس روش برگمن و همکاران (۵) دو روز قبل از برداشت، گیاهان با سدیم سالیسیلات ۵۰ میلی مولار روزانه اسپری شدند و سه تا شش ساعت قبل از برداشت نیز بافت هیپوکتیل آنها زخمی شدند. هیپوکتیل‌ها بعد از برداشت و شستشو با آب مقطر استریل، به قطعات کوچک بریده شدند و به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۶۰- درجه سانتی‌گراد و فشار ۰/۰۱ اتمسفر لیوفلیزه شدند.

استخراج PGIP از هیپوکتیل ده روزه واریته‌های ناز و درخشان لوبیا به روش ترکیبی سرونی و همکاران (۷) و فیورون (۱۹) همراه با اندکی تغییر انجام گرفت. سه گرم از پودر لیوفلیزه شده در ۲۵ میلی لیتر از بافر کم نمک

شدت بیماری زایی زیاد (highly virulent) تهیه و مورد استفاده قرار گرفتند (۳۱ و ۴۴). این جدایه‌ها به ترتیب روی گندم در دمای اپتیمم 22 ± 2 درجه سانتی‌گراد و محیط آگار سیب زمینی - دکستروز (PDA) ۳۹ گرم در لیتر در دمای اپتیمم 20 ± 2 درجه سانتی‌گراد رشد داده شده و در ۴ درجه سانتی‌گراد نگه‌داری شدند (۳۱ و ۴۴).

آنزیم *Aspergillus niger* PG از شرکت سیگما تهیه شد. قبل از استفاده، مقدار کافی از این آنزیم در بافر A حل و جهت حذف نمک و گلیسرول دیالیز گردید.

استخراج آنزیم‌های پلی گالاکتوروناز

برای فراهم نمودن شرایط مناسب جهت تولید آنزیم‌های پکتینازی توسط جدایه‌های F15 و IK04 از محیط کشت زایموگرم (Pectic Zymogram medium / PZ $\text{pH}=4.5$) که شامل ده گرم پکتین سیب (فلوکا)، ۲/۶۴ گرم سولفات آمونیوم، ۰/۳۴ گرم فسفات دی پتاسیم هیدروژن و ۰/۱۴ گرم سولفات منیزیم (۷ ملکول آب) در حجم نهایی یک لیتر آب مقطر با ۴/۵ pH استفاده گردید (۴۰). جدایه‌ها در ارلن‌های نیم لیتری حاوی ۱۰۰ میلی لیتر از محیط PZ به مدت ۱۰ روز (برای F15) و ۷ روز (برای IK04) در دمای اپتیمم ذکر شده و در ۲۵۰ دور در دقیقه کشت داده شدند. سپس آنزیم‌های پکتینازی با استفاده از متد برجر و همکاران (۴) با اندکی تغییرات استخراج گردید. به این نحو که محیط مایع بعد از کشت با فیلترهای ۰/۲۲ میکرومتر (Millipore, USA) صاف شد و جهت حذف پکتین بعد از رسوب دهی با سولفات آمونیوم ۸۵ درصد اشباع، رسوب در بافر سدیم استات ۲۰ میلی مولار با $\text{pH} = 5$ (بافر A) حل گردید و در مقابل این بافر دیالیز گردید. محلول حاصل به عنوان محلول حاوی آنزیم پلی گالاکتوروناز مورد استفاده قرار گرفت.

اندازه‌گیری فعالیت آنزیم پلی گالاکتوروناز (PG)

فعالیت آنزیم پلی گالاکتوروناز با اندازه‌گیری محصولات قندی احیا شده در مخلوط واکنش با روش کالمر و همکاران (۱۱)

(low-salt buffer/LSB) که شامل ۵۰ میلی مولار سدیم استات با $\text{pH} = 5$ ، ۳ میلی مولار اتانل دی آمین تتراسیتیک اسید، ۱ میلی مولار دی تیوتریتول و گلیسرول ۱۰ درصد بود، حل شد و به مدت حداقل نیم ساعت در ۴ درجه سانتی گراد روی همزن مغناطیسی هم زده شد. سپس در g ۱۲۰۰۰ در ۴ درجه سانتی گراد به مدت ۳۰ دقیقه سانتریفیوژ شد. محلول رویی به ظرف تمیز منتقل گردید و رسوب به منظور استخراج مجدد در ۱۵ میلی لیتر از بافر با نمک بالا (high- / 1M NaCl + LSB salt buffer) حل شد و به مدت حداقل نیم ساعت (ترجیحا در طول شب) در ۴ درجه سانتی گراد روی همزن مغناطیسی هم زده شد. سپس مجددا در همان شرایط سانتریفیوژ شد و فاز رویی به ظرف قبلی اضافه گردید. محلول جمع آوری شده به منظور کدورت زدایی در g ۱۵۰۰۰ در ۴ درجه سانتی گراد به مدت ۲۰ دقیقه سانتریفیوژ گردید و سپس با سولفات آمونیوم در غلظت نهایی ۸۵ درصد اشباع رسوب دهی شد. رسوب در ۵ میلی لیتر از بافر A حل و یک شب در مقابل این بافر دیالیز شد و بعد از افزودن PMSF (penylmethyl sulfnyl flouride) تا غلظت نهایی یک میلی مولار برای مرحله بعد در 20°C درجه سانتی گراد نگهداری گردید.

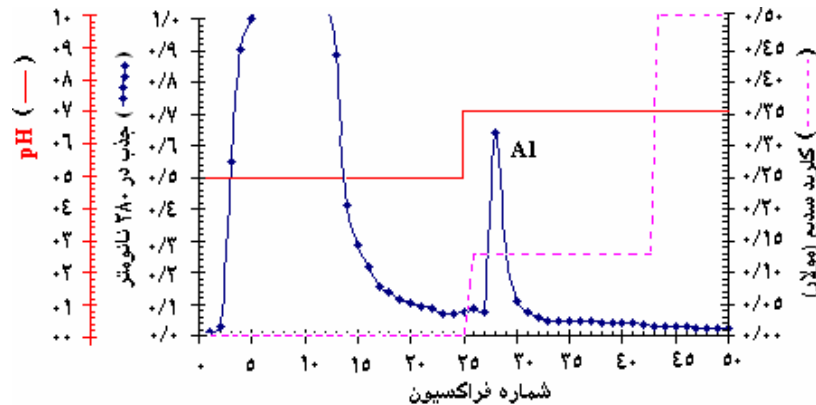
کروماتوگرافی جذبی

کروماتوگرافی جذبی براساس دستورالعمل فارماسیا انجام شد. دو گرم رزین خشک Sepharose 4B فعال شده با سیانوزن برومید (فارماسیا) در ۴۰۰ میلی لیتر از محلول یک میلی مولار اسید کلریدریک به تعلیق در آمد و ۱۵ دقیقه در این محلول نگهداری شد تا متورم گردید. پس از سانتریفیوژ با دور کم، ژل رسوب داده شد و مایع رویی دور ریخته شد. ژل متورم شده به یک بشر ۴۰ میلی لیتر منتقل شد و به آن ۱۴ میلی لیتر محلول ۰/۱ مولار کربنات هیدروژن سدیم با $\text{pH} = 8.3$ که حاوی نیم مولار کلرید سدیم و ۵۰ میلی گرم لیگاند PG قارچ (*A. niger* (Sigma) بود اضافه شد و ۲/۵ ساعت در دمای اتاق به آرامی تکان داده شد. سپس گروه‌های فعال باقی مانده ژل با افزودن دو حجم از

محلول ۱۰۰ میلی مولار تریس - کلر با $\text{pH} = 8$ به مدت ۲-۳ ساعت مسدود گردید. ژل آماده شده به ستون دست ساز با قطر ۰/۹۵ سانتی متر و ارتفاع ۹ سانتی متر منتقل شد. ستون ۵ بار به‌طور متناوب هر بار با ۵ حجم ستون از بافرهای ۱۰۰ میلی مولار استات سدیم با $\text{pH} = 8$ و ۱۰۰ میلی مولار تریس - کلر با $\text{pH} = 8$ که واجد نیم مولار کلرید سدیم بودند، شستشو داده شد. سپس با بافر A به تعادل رسید. نمونه‌های پروتئینی با غلظت ۲/۷۲ میلی گرم در میلی لیتر در بافر A با سرعت ۱۸ میلی لیتر بر ساعت وارد ستون گردید. سپس ستون با بافر A مجددا شستشو داده شد تا جذب در طول موج ۲۸۰ نانومتر به کمتر از ۰/۰۱ رسید. برای جدا شدن پروتئین‌های متصل به بستر، ابتدا از بافر A واجد ۰/۱۳ مولار کلرید سدیم تا رسیدن خروجی ستون به کمتر از ۰/۰۱ و سپس از بافر PBS حاوی ۰/۵ مولار کلرید سدیم با $\text{pH} = 7.2$ براساس گزارش برجر و همکاران (۴) استفاده شد. کلیه فراکسیون‌ها در حجم‌های ۳ میلی لیتری جمع آوری و جذب آنها در طول موج ۲۸۰ نانومتر اندازه‌گیری شد.

اندازه‌گیری فعالیت مهار PGIP

میزان فعالیت PGIP براساس کاهش گروه‌های احیا شده توسط آنزیم پلی گالاکتوروناز به روش کلمر و همکاران و در $\text{pH} = 5-5.3$ مورد بررسی گرفت (۱۱). برای اندازه‌گیری فعالیت مهار PGIP، ۴۰ میکرولیتر مخلوط واکنش شامل ۱۰ میکرولیتر از آنزیم، ۳۰ میکرولیتر از PGIP در بافر A تهیه گردید. بعد از ۲۰ دقیقه قرار دادن مخلوط واکنش در دمای اتاق، ۲۱۰ میکرولیتر سوبسترای ۰/۲۴ درصد (w/v) پلی گالاکتورونیک اسید $\text{pH} = 5.3$ اضافه شد و در دمای ۳۷ درجه سانتی گراد به مدت ۲۰ دقیقه اینکوبه گردید. واکنش با اضافه کردن ۲۵۰ میکرولیتر معرف مس و نیز قرار دادن در حمام آب جوش به مدت ۱۰ دقیقه متوقف شد. بعد از سرد شدن، ۵۰۰ میکرولیتر معرف آرسنو مولیبدات به مخلوط اضافه گردید و گروه‌های احیا شده در طول موج ۵۰۰ نانومتر مورد سنجش.



شکل ۱. کروماتوگرام حاصل از کروماتوگرافی جذبی با استفاده از ستون سفارز ۴ B حاوی لیگاند آنزیم پلی گالاکتوروناز قارچ *A. niger*

گیاهان و موثر در بیماری‌زایی قارچ‌ها) و مهار فعالیت آنها دارند، لذا جهت دستیابی به فرم خالص این گلیکوپروتئین‌ها برای بررسی و مطالعه اثر مهار کنندگی آنها بر میزان فعالیت آنزیم پلی گالاکتوروناز قارچ‌های بیماری‌زای *F. oxysporum* و *A. rabiei* در گیاه نخود، در این تحقیق اقدام به خالص‌سازی PGIP در واریته‌های ناز و درخشان از گیاه لوبیا گردید.

جداسازی PGIP با استفاده از کروماتوگرافی جذبی

جهت خالص‌سازی PGIP از پروتئین‌های استخراج شده از هیپوکتیل واریته‌های ناز و درخشان گیاه لوبیا مقدار ۷۰/۷۲ میلی‌گرم پروتئین استخراج شده به ستون Sepharose 4B اضافه گردید. در کروماتوگرافی جذبی که در ستون Sepharose 4B حاوی لیگاند آنزیم پلی گالاکتوروناز انجام گرفت، بخش عمده‌ای از محتوی پروتئینی (فراکسیون‌های ۲ الی ۱۵) عصاره استخراج شده هیپوکتیل که فاقد فعالیت مهاری بود بدون تمایل به ستون و با شستشو توسط بافر با $\text{pH} = 5$ از آن خارج گردید (شکل ۱). پس از این که جذب خروجی ستون به کمتر از ۰/۰۱ رسید، پروتئین‌های متصل شده به ستون طی دو روش از آن خارج شدند. روش اول توسط افزایش pH و قدرت یونی بافر به‌طور هم‌زمان براساس متد پیشنهادی برجر و همکاران (۴) صورت گرفت. بدین صورت که ستون با بافر PBS (حاوی کلرید سدیم ۰/۱۳ مولار) با $\text{pH} = 7/2$ شستشو شد و در پایان

قرار گرفت نمونه کنترل در این گونه از آزمایش‌های محلول‌های PGIP و PGIP هستند که به مدت یک ساعت جوشانده شدند. بنا به تعریف یک واحد PGIP مقدار مهار کننده لازم برای کاهش ۵۰ درصد فعالیت یک واحد آنزیم پلی گالاکتوروناز تحت این شرایط است.

اندازه‌گیری غلظت پروتئین

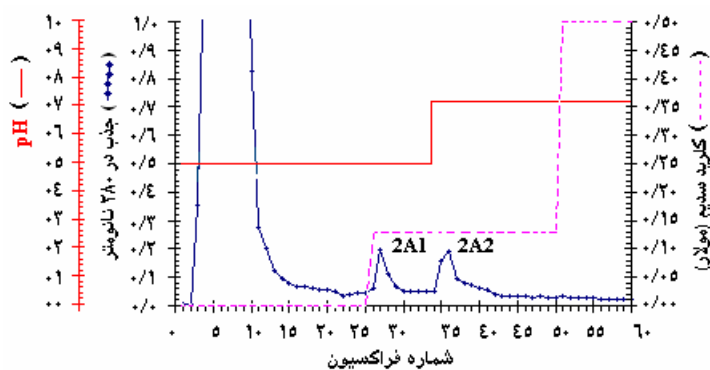
اندازه‌گیری غلظت پروتئین به روش برادفورد (۶) انجام گرفت. در این روش از آلبومین سرم گاوی (Sigma, BSA) به عنوان استاندارد استفاده شد.

شرایط SDS-PAGE و رنگ آمیزی

الکتروفورز در ژل پلی آکرلامید در حضور سدیم دو سولفات سولفات (SDS-PAGE) به روش لاملی (۲۶) در ژل جداکننده ۱۰ درصد و ژل متراکم کننده ۴ درصد صورت گرفت. بعد از الکتروفورز، ژل به روش کوماسی آبی (۴۳) یا نیترات نقره رنگ‌آمیزی گردید. رنگ آمیزی نقره اسیدی براساس روش مورسی (۳۰) انجام گرفت.

نتایج

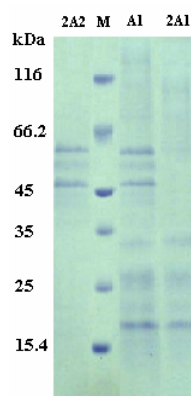
با توجه به این‌که پروتئین‌های مهار کننده آنزیم پلی گالاکتوروناز (PGIP) تمایل شدیدی جهت اتصال به آنزیم پلی گالاکتوروناز قارچی (آنزیم‌های تخریب کننده دیواره سلولی



شکل ۲. کروماتوگرام حاصل از کروماتوگرافی جذبی با استفاده از ستون سفارز B ۴ حاوی لیگاند آنزیم پلی گالاکتورناز قارچ *A. niger*

pH=۵ و خارج شدن پروتئین‌های متصل نشده به لیگاند (فراکسیون‌های ۲ الی ۱۵، شکل ۲) برای جدا نمودن پروتئین‌های متصل شده به ستون، ابتدا قدرت یونی بافر، سپس pH آن افزایش یافت. بدین صورت که ابتدا با استفاده از قدرت یونی ۰/۱۳ مولار کلرید سدیم که به بافر A اضافه شد (pH = ۵)، جهت جدا شدن پروتئین‌ها از ستون استفاده شد. سپس توسط بافر PBS حاوی ۰/۱۳ مولار کلرید سدیم با pH = ۷/۲ شستشوی ستون ادامه یافت. در پایان برای اطمینان کامل از جدا کردن تمامی پروتئین‌های متصل شده به ستون، جریان بافر PBS حاوی ۰/۵ مولار کلرید سدیم با pH = ۷/۲ برقرار گردید. قسمت عمده پروتئین‌ها در مرحله شستشو توسط بافر با pH= ۵ از ستون خارج گردید (فراکسیون‌های ۲ الی ۱۳) (شکل ۲). این پروتئین‌ها فاقد فعالیت مهار کنندگی بودند. اندازه‌گیری میزان پروتئین‌های فراکسیون‌های پس از اعمال غلظت نمکی ۰/۱۳ مولار کلرید سدیم (فراکسیون‌های ۲۵ الی ۶۰) نشان داد که فراکسیون‌های ۲۶ الی ۲۹ (قله 2A1) و فراکسیون‌های ۳۴ الی ۳۷ (قله 2A2) حاوی پروتئین می‌باشند (شکل ۲). جهت استحصال پروتئین‌های این دو قله، فراکسیون‌های مربوط به این دو قله به‌طور جداگانه مخلوط گردیدند و پس از رسوب دهی، دیالیز شدند.

نتیجه بررسی فعالیت مهار کنندگی این پروتئین‌ها نشان داد که پروتئین‌های موجود در قله دوم (2A2) واجد فعالیت مهاری می‌باشند. الگوی SDS-PAGE محتویات این قله بیانگر دو باند



شکل ۳. SDS-PAGE پروتئین‌های متصل به ستون جذبی که با استفاده از تغییر pH و قدرت یونی به‌طور هم‌زمان (محصول قله A1 شکل ۱) و روش دو مرحله‌ای (محصول قله‌های 2A1 و 2A2 شکل ۲) جدا شده‌اند. M = مارکر پروتئینی

برای اطمینان کامل از جدا کردن تمامی پروتئین‌های متصل شده به ستون، جریان بافر PBS حاوی ۰/۵ مولار کلرید سدیم با pH = ۷/۲ برقرار گردید. نتایج حاصله نشان داد که از فراکسیون‌های ۲۷ الی ۳۰ حاوی پروتئین بودند (قله A1 شکل ۱). جهت استحصال پروتئین، این فراکسیون‌ها مخلوط و با عمل دیالیز نمک زدایی گردید. مطالعه مهار کنندگی پروتئین‌های به‌دست آمده نشان داد که این پروتئین‌ها دارای فعالیت مهار کنندگی می‌باشند. نتایج SDS-PAGE نشان داد که محتوی قله A1 حاوی سه باند پروتئینی در محدوده ۴۷-۵۵ کیلوالتون و چند باند در محدوده باندی ۱۵ تا ۳۳ کیلوالتون می‌باشد (شکل ۳). در روش دوم پس از شستشوی ستون توسط بافر A با

جدول ۱. خلاصه‌ای از مراحل خالص‌سازی PGIP هیپوکوتیل لوبیا با استفاده از کروماتوگرافی جذبی در این جدول نشان داده شده است. فعالیت PGIP براساس میزان مهاری که روی یک واحد از آنزیم پلی‌گالاکتوروناز قارچ *A.niger* در روش کالمر دارد می‌باشد.

مرحله خالص‌سازی	حجم (ml)	پروتئین (mg/ml)	پروتئین کل (mg)	فعالیت آنزیمی (U/ml)	فعالیت کل (U)	فعالیت ویژه آنزیمی (U/mg)	درصد محصول نهایی	خلوص محصول
پروتئین استخراج شده	۹۴	۰/۹	۸۴/۴	۲۳/۸	۲۲۴۱/۹	۲۶/۵	۱۰۰	۱
رسوب پروتئین با سولفات آمونیوم سولفات ۸۵ درصد اشباع	۲۶	۲/۷	۷۰/۷	۸۶/۱	۲۲۳۹/۳	۳۱	۱۰۰	۱/۱۶
پروتئین خالص شده با کروماتوگرافی جذبی	۰/۹	۰/۹	۰/۸۱	۱۳۴/۸	۱۲۱/۳	۱۴۹/۸	۵/۴	۵/۶

کنندگی بر آنزیم پلی‌گالاکتوروناز قارچ *F. oxysporum* از خود نشان می‌دهند در حالی که پس از خالص‌سازی با روش جذبی این میزان مهار کنندگی تا ۴۰ واحد افزایش یافته است. فعالیت مهار کنندگی پروتئین‌های استخراج شده از واریته درخشان (قبل از خالص‌سازی) بر آنزیم پلی‌گالاکتوروناز قارچ *F. oxysporum* معادل ۲۸ واحد بوده در صورتی که این میزان مهار کنندگی پس از خالص‌سازی PGIP به ۴۰ واحد می‌رسد (شکل ۴). همین بررسی در مورد مهار کنندگی PGIP این دو واریته (ناز و درخشان) بر میزان فعالیت آنزیم پلی‌گالاکتوروناز قارچ *A. rabiei* نشان می‌دهد که فرم ناخالص PGIP استخراج شده از هیپوکوتیل واریته ناز به میزان ۹ واحد فعالیت مهار کنندگی از خود نشان می‌دهد در صورتی که پس از خالص‌سازی این میزان مهار کنندگی به ۱۸ واحد افزایش می‌یابد. میزان مهار کنندگی PGIP واریته درخشان قبل از خالص‌سازی ۹ واحد بوده و پس از خالص‌سازی به ۲۹ واحد افزایش می‌یابد (شکل ۴).

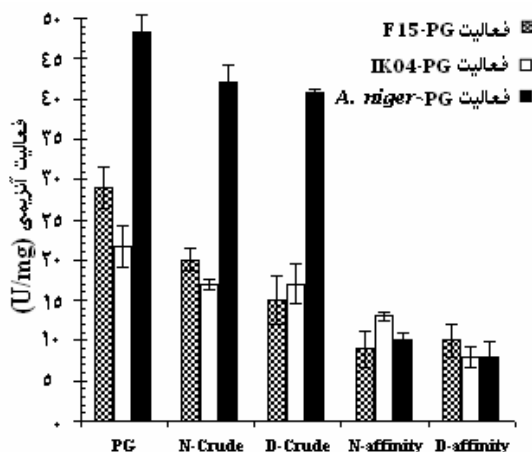
هم‌چنین در این مطالعه از آنزیم پلی‌گالاکتوروناز خالص شده تجاری تهیه شده از قارچ *A. niger* جهت بررسی میزان مهار کنندگی PGIP این دو واریته استفاده گردید. نتایج حاصله نشان داد که PGIP واریته ناز قبل از خالص‌سازی به میزان ۱۳ واحد فعالیت مهار کنندگی از خود نشان می‌دهد در صورتی که پس از خالص‌سازی این میزان به ۷۷ واحد افزایش می‌یابد. نتایج مشابهی در مورد میزان مهار کنندگی PGIP واریته

قوی پروتئینی نزدیک به هم در محدوده ۴۷-۵۵ کیلودالتونی و یک باند ضعیف تر بین این دو باند می‌باشد (شکل ۳). پروتئین‌های موجود در قله اول (2A1) پروتئین‌هایی با وزن پائین بوده (شکل ۳) و فاقد فعالیت مهار کنندگی می‌باشند.

روش جداسازی PGIP در کروماتوگرافی جذبی نشان داد که این روش می‌تواند میزان فعالیت ویژه PGIP را از ۲۶/۵ U/mg قبل از خالص‌سازی به ۱۴۹/۸ U/mg بعد از خالص‌سازی و به میزان ۵/۶ برابر افزایش دهد (جدول ۱).

روش خالص‌سازی PGIP در کروماتوگرافی جذبی مورد مطالعه نشان داد که این روش می‌تواند میزان فعالیت ویژه PGIP را از ۲۶/۵ U/mg قبل از خالص‌سازی به ۱۴۹/۸ U/mg بعد از خالص‌سازی به میزان ۵/۶ برابر افزایش دهد (جدول ۱).

با توجه به خالص‌سازی نسبی PGIP در کروماتوگرافی جذبی و به‌دست آوردن یک مجموعه پروتئینی با دارا بودن فعالیت مهار کنندگی آنزیم پلی‌گالاکتوروناز (قله 2A2 در شکل ۲) در این مرحله فعالیت مهار کنندگی این پروتئین‌ها نسبت به پروتئین‌های استخراج شده از واریته‌های ناز و درخشان (قبل از خالص‌سازی) بر فعالیت آنزیم پلی‌گالاکتوروناز قارچ‌های *A. niger*، *A. rabiei*، *F. oxysporum* مورد بررسی و مقایسه قرار گرفت (شکل ۴). نتایج به‌دست آمده نشان می‌دهند پروتئین‌های استخراج شده از هیپوکوتیل واریته ناز (قبل از خالص‌سازی) معادل ۱۸ واحد فعالیت مهار



شکل ۴. کاهش فعالیت آنزیم پلی گالاکتوروناز در میانکنش با PGIP برای محاسبه میزان فعالیت مهارى PGIP، از میزان کاهش فعالیت آنزیم پلی گالاکتوروناز استفاده شده است. به طوری که هر واحد فعالیت PGIP برابر کاهش ۵۰ درصد از فعالیت یک واحد از آنزیم پلی گالاکتوروناز می باشد.

- PGIP = N-crude استخراج شده از هیپوکتیل واریته ناز قبل از خالص سازی
- PGIP = D- crude استخراج شده از هیپوکتیل واریته درخشان قبل از خالص سازی
- PGIP = N- affinity استخراج شده از هیپوکتیل واریته ناز بعد از خالص سازی
- PGIP = D- affinity استخراج شده از هیپوکتیل واریته درخشان بعد از خالص سازی

پروتئین‌های مهار کننده آنزیم پلی گالاکتوروناز (PGIP) می باشند که با مهار کردن فعالیت آنزیم پلی گالاکتوروناز قارچی مانع کلونیزاسیون قارچ بیماری زا می شوند (۱۴ و ۱۵).

این پروتئین‌ها در گیاهان دارای توانایی تشخیص و مهار اختصاصی متنوع بوده به طوری که PGIP‌های استخراج شده از یک بافت نیز قدرت ممانعتی متفاوتی از خود نشان می دهند به عنوان مثال بیش از ۲۰ ایزوفرم PGIP که در برگ‌های تره (*Allium porrum* L.) یافت شده اند هر کدام دارای اثر مهارى متفاوتی می باشند (۱۹ و ۳۸). گزارش‌ها نشان می دهند PGIP‌هایی که از لحاظ خواص بیوشیمیایی نیز بسیار نزدیک به هم می باشند دارای فنوتیپ مهارى متفاوتی هستند (۱۲ و ۱۶). این موضوع، اهمیت انتخاب PGIP‌های مناسب را برای مقابله بهتر با آلودگی قارچی نشان می دهد.

در این تحقیق جهت بررسی اثر مهارى PGIP بر فعالیت آنزیم پلی گالاکتوروناز قارچ‌های بیماری‌زای *F. oxysporum* و *A. rabiei* از PGIP دو واریته ناز و درخشان لوبیا استفاده گردید.

درخشان بر فعالیت این آنزیم مشاهده گردید که در آن میزان مهار کنندگی فرم ناخالص PGIP برابر ۱۶ واحد بوده و پس از خالص سازی به ۸۰ واحد افزایش می یابد (شکل ۴).

مقایسه میزان مهار کنندگی PGIP قبل و بعد از خالص سازی در دو واریته ناز و درخشان بر فعالیت آنزیم پلی گالاکتوروناز سه قارچ پروتئین‌های خالص شده در روش کروماتوگرافی جذبی استفاده شده در این تحقیق دارای فعالیت مهار کنندگی آنزیم پلی گالاکتوروناز می باشند. همچنین این نتایج نشان می دهند که این روش خالص سازی طی یک مرحله قادر به خالص نمودن نسبی PGIP از هیپوکتیل گیاه لوبیا می باشد.

بحث

ژن‌های دخیل در مکانیسم‌های دفاعی در گیاهان بعد از تماس گیاه با یک عامل زنده و یا غیر زنده فعال می شوند (۳۳). از جمله ژن‌های موثر در مقاومت گیاهان، ژن‌های تولید کننده

سایت N-گیلیوزیدی (۴۲)) می‌باشند. بنابراین انتظار می‌رود این ترکیبات دارای وزن مولکولی بیشتری نسبت به محدوده وزنی پیش بینی شده براساس ساختار اولیه شان (بین دو حد کمترین (تقریباً ۳۶/۷۷۳۳ کیلودالتون برای PVPGIP2) و بیشترین (تقریباً ۳۷/۸۰۱۸ کیلودالتون برای PVPGIP3)) باشند (۴ و ۷). نتایج این تحقیق نشان داد که محدوده تقریبی وزنی از ۴۷ تا ۵۵ کیلودالتون برای این گونه از پروتئین‌ها احتمالاً به دلیل میزان گلیکوزیله شدن متفاوت در PGIP‌های به دست آمده باشد.

هم‌چنین در منابع گزارش گردیده است که PGIP موجود در محلول استخراجی هیپوکتیل لوبیا قبل از خالص‌سازی قادر به مهار آنزیم پلی گالاکتوروناز قارچ‌های *Colletotrichum lindemuthianum* و *Sclerotium rolfsii* بوده است در حالی که بعد از خالص‌سازی قادر به مهار آنزیم پلی گالاکتوروناز قارچ *Sclerotium rolfsii* نمی‌باشد (۲). بنابراین انتظار می‌رود که خالص‌سازی این دسته از پروتئین‌ها سبب شود تا فنوتیپ عملکردی متفاوتی از خودشان نشان بدهند. نتایج به دست آمده در این تحقیق نیز نشان می‌دهد که PGIP‌های استخراج شده از هیپوکتیل واریته‌های ناز و درخشان لوبیا، قبل و بعد از خالص‌سازی رفتارهای مهاری متفاوتی را بر میزان فعالیت آنزیم پلی گالاکتوروناز قارچ‌های *F. oxysporum* و *A. rabiei* از خود نشان می‌دهند (شکل ۴).

با توجه به پیش بینی عملکرد اختصاصی PGIP‌ها در مهار فعالیت آنزیم پلی گالاکتوروناز قارچی، در این تحقیق نیز عملکرد اختصاصی PGIP استخراج شده از دو واریته ناز و درخشان لوبیا بر فعالیت آنزیم پلی گالاکتوروناز قارچ‌های *F. oxysporum* و *A. rabiei* نشان داده شد. پاتوژن‌های *Fusarium oxysporum* در ایجاد پوسیدگی آوندی نخود (زردی نخود) و قارچ *Ascochyta rabiei* در ایجاد برق زدگی نخود نقش داشته و خسارت شدیدی به مزارع نخود وارد می‌نمایند (۳۲ و ۳۵). لذا نتایج این تحقیق می‌تواند زمینه ساز مطالعات بیشتر در جهت مدیریت کنترل این دسته از بیماری‌ها با مقاوم سازی این محصولات استراتژیک قرار گیرد.

در این مطالعه نشان داده شد که می‌توان از روش کروماتوگرافی جذبی (sepharose 4B) با استفاده از لیگاند آنزیم پلی گالاکتوروناز قارچ *A. niger* برای خالص‌سازی پروتئین‌های مهار کننده آنزیم پلی گالاکتوروناز قارچ‌های مختلف استفاده نمود. نتایج به دست آمده نشان داد که PGIP‌های استخراج شده از هیپوکتیل واریته‌های ناز و درخشان لوبیا، قبل و بعد از خالص‌سازی به ترتیب به میزان ۱۰ و ۷۹ درصد از خود فعالیت مهاری بر آنزیم پلی گالاکتوروناز قارچ *A. niger* نشان می‌دهند. از آنجا که لیگاند مورد استفاده جهت این خالص‌سازی آنزیم پلی گالاکتوروناز قارچ *A. niger* بوده است نتایج فوق مورد انتظار می‌باشد. در این روش میزان فعالیت ویژه PGIP از ۲۶/۵ U/mg به ۱۴۹/۸ U/mg یعنی به میزان ۵/۶ برابر افزایش می‌یابد.

نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که با انتخاب این روش خالص‌سازی می‌توان به مقدار PGIP مناسبی دست یافت. به طوری که بازده خالص‌سازی PGIP با استفاده از کروماتوگرافی جذبی به میزان ۱/۶۸ میلی‌گرم PGIP به ازای ۱۰۰ گرم هیپوکتیل تازه لوبیا (معادل تقریبی ۵/۶ گرم هیپوکتیل لیوفیلیزه) می‌باشد. مقایسه این نتایج با نتایج گزارش شده توسط برگر و همکاران و سرونی و همکاران نشان می‌دهد که آنها نیز با استفاده از روش کروماتوگرافی جذبی به ترتیب میزان یک و ۱/۳ میلی‌گرم PGIP از همین مقدار هیپوکتیل را خالص نموده‌اند (۴ و ۷).

دو ویدیو و همکاران (۱۲) با مطالعه روی ژن *pgip* ژنوتیپ‌های *Pinto* و *BAT93* در لوبیا نشان دادند که ژن‌های *pgip* به صورت خانواده ژنی در منطقه‌ای به وسعت ۵۰ کیلو جفت باز روی کروموزوم شماره ۱۰ لوبیا (*Phaseolus vulgaris*) قرار دارند. نتایج ارائه شده در این مطالعه نشان داد که محصولات کروماتوگرافی جذبی (قله 2A2 در شکل ۲) در ژل SDS-PAGE در ناحیه ۴۷-۵۵ کیلودالتون دارای سه باند نزدیک به هم با فعالیت مهار کنندگی می‌باشند (شکل ۳). با توجه به این که غالب PGIP‌ها دارای پتانسیل متفاوتی برای سایت‌های N-گیلیکوزیدی می‌باشند (PGIP-1 دارای سه سایت (۱۶، ۲۸ و ۴۲)، PGIP-2 دارای دو سایت (۲۸ و ۲۹) و PGIP-3 دارای پتانسیل برای سه

منابع مورد استفاده

1. Abu-Goukh, A.A. and J. M. Labavitch. 1983. The in vivo role of "Bartlett" pear fruit polygalacturonase inhibitors. *Physiol. Plant Pathol.* 23: 123-135.
2. Albersheim, P. and A.J. Anderson. 1971. Proteins from plant cell walls inhibit polygalacturonases secreted by plant pathogens. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 68: 1815-19
3. Alghisi, P. and F. Favaron. 1995. Pectin degrading enzymes and plant parasite interactions. *Eur. J. Plant Pathol.* 101: 365-375.
4. Berger, D.K., D. Oelofse, M.S. Arendse, E. Du Plessis and I. A. Dubery. 2000. Bean polygalacturonase inhibitor protein-(PGIP-1) inhibits polygalacturonases from *Stenocarpella maydis*. *Physiol. and Mol. Plant Pathol.* 57: 5-14.
5. Bergmann, C.W., Y. Ito, D. Singer, P. Albersheim, A.G. Darvill, N. Benhamou, L. Nuss, G. Salvi, F. Cervone and G. De Lorenzo. 1994. Polygalacturonase-inhibiting protein accumulates in *Phaseolus vulgaris* L. in response to wounding, elicitors and fungal infection. *Plant J.* 5: 625-634.
6. Bradford, M. M. 1976. A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding. *Anal. Biochem.* 72: 248-254
7. Cervone, F., G. De Lorenzo, L. Degra, G. Salvi and M. Bergami. 1987. Purification and Characterization of a Polygalacturonase-Inhibiting Protein from *Phaseolus vulgaris* L. *Plant Physiol.* 85: 631-637.
8. Cervone, F., M.G. Hahn, G. De Lorenzo, A. Darvill and P. Albersheim. 1989. Hostpathogen interactions. XXXIII. A plant protein converts a fungal pathogenesis factor into an elicitor of plant defense responses. *Plant Physiol.* 90: 542-48.
9. Cervone, F., G. De Lorenzo, R. Pressey, A. Darvill and P. Albersheim. 1990. Can Phaseolus PGIP inhibit pectic enzymes from microbes and plants. *Phytochem.* 29: 447-449.
10. Collmer, A. and N.T. Keen. 1986. The role of pectic enzymes in plant pathogenesis. *Annu. Rev. Phytopathol.* 24: 383-409.
11. Collmer, A., J.L. Ried and M. S. Mount. 1988. Assay methods for pectic enzymes. *Methods in Enzymol.* 161: 329-335
12. D'Ovidio, R., A. Raiola, C. Capodicasa, A. Devoto, D. Pontiggia, S. Roberti, R. Galletti, E. Conti, D. O'Sullivan and G. De Lorenzo. 2004. Characterization of the Complex Locus of Bean Encoding Polygalacturonase-Inhibiting Proteins Reveals Subfunctionalization for Defense against Fungi and Insects. *Plant Physiol.* 135: 2424-2435.
13. De Lorenzo, G., F. Cervone, D. Bellicampi, C. Caprari, A.J. Clark, A. Desiderio, A. Devoto, R. Forrest, F. Leckie, L. Nuss and G. Salvi. 1994. Polygalacturonase, PGIP and oligogalacturonides in cell-cell communication. *Biochem. Sci. Trans.* 22:396-399.
14. De Lorenzo, G., R. Castoria, D. Bellincampi and F. Cervone. 1997. Fungal invasion enzymes and their inhibition. PP. 61-83. *In: Carrol, G. and P. Tudzynski (Eds.), The Mycota. V. Plant Relationships. Part B. Springer Pub., Berlin.*
15. De Lorenzo, G., R D. Ovidio and F. Cervone. 2001. The role of polygalacturonase-inhibiting proteins (PGIPs) in defense against pathogenic fungi. *Annu. Rev Phytopathol.* 39: 313-335.
16. Desiderio, A., B. Aracri, F. Leckie, B. Mattei, G. Salvi, H. Tigelaar, J.S.C. Van Roekal, D.C. Baulcombe, L.S. Melchers, G. De Lorenzo and F. Cervone. 1997. Polygalacturonase-inhibiting proteins (PGIPs) with different specificities are expressed in *Phaseolus vulgaris*. *Mol. Plant-Microbe Interact.* 10: 852-60
17. Dixon, M., D. Jones, J. Keddie, C. Thomas, K. Harison and J. Jones. 1996. The tomato Cf-2 disease resistance locus comprises two functional genes encoding leucine-rich repeats proteins. *Cell.* 84: 457-459.
18. Favaron, F., R. D'ovidio, E. Porceddu and P. Alghisi. 1994. Purification and molecular characterization of a soybean polygalacturonase-inhibiting protein. *Planta* 195: 80-87.
19. Favaron, F. 2001. Gel detection of *Allium porrum* polygalacturonase-inhibiting protein reveals a high number of isoforms. *Physiological and Molecular Plant Pathol.* 58: 239-245
20. Ferrari S., D. Vairo, F.M. Ausubel, G. Cervone, G. De Lorenzo. 2003. Tandemly duplicated *Arabidopsis* genes that encode polygalacturonase- inhibiting proteins are regulated coordinately by different signal transduction pathways in response to fungal infection. *Plant Cell* . 15: 93-106.
21. Grant, M.R., L. Godiard, E. Straube, T. Ashfield, J. Lewald, A. Sattier, R.W. Innes and J.L. Dangl. 1995. Structure of the *Arabidopsis* RPM 1 gene enabling dual specificity disease resistance. *Sci.* 269: 843-845.
22. Hahn, M.G., P. Buchell, F. Cervone, S. H. Doares, R.A. O'Neill, A. Darvill and P. Albersheim. 1989. Roles of cell wall constituents in plant pathogen interactions. PP. 131-181. *In: E. Nester and T. Kosuge (Eds.), Plant-Microbe Interactions. McGraw-Hill, New York.*
23. Huang, Q. and C. Allen. 2000. Polygalacturonases are required for rapid colonization and full virulence of *Ralstonia solanaceae* on tomato plants. *Physiol. Mol. Plant Pathol.* 57: 77-83.
24. Johnston, D.J., V. Ramanathan and B. Williamson. 1993. A protein from immature raspberry fruits which inhibits endopolygalacturonases from *Botrytis cinerea* and other micro-organisms. *J. Exp. Bot.* 44: 971-976.

25. Johnston, D.J., B. Williamson and G.P. Mcmillan. 1994. The interactions in planta of polygalacturonases from *Botrytis cinerea* with a wall-bound polygalacturonase-inhibiting protein (PGIP) in raspberry fruits. *J. Exp. Bot.* 45: 1837–1843.
26. Laemmli, U.K. 1970. Cleavage of structural proteins during the assembly of the head of bacteriophage T4. *Nature* 227:680-685.
27. Lafitte, C., J. Barthe, J. Montillet and A. Touze. 1984. Glycoprotein inhibitors of *Colletotrichum lindemuthianum* endopolygalacturonase in near isogenic lines of *Phaseolus vulgaris* resistant and susceptible to anthracnose. *Physiol. Plant Pathol.* 25: 39–53.
28. Leckie, F., B. Mattei, C. Capodicasa, A. Hemmings, L. Nuss, B. Aracri, G. De Lorenzo and F. Cervone. 1999. The specificity of polygalacturonase-inhibiting protein (PGIP): a single amino acid substitution in the solvent-exposed b-strand/b-turn region of the leucine-rich repeats (LRRs) confers a new recognition capability. *European Mol. Biol. Organization (EMBO) J.* 18: 2352–2363.
29. Mattei, B., M.S. Bernalda, L. Federici, P. Roepstorff, F. Cervone and A. Boffi. 2001. Secondary structure and posttranslational modifications of the leucine-rich repeat protein PGIP (polygalacturonase-inhibiting protein) from *Phaseolus vulgaris*. *Biochem.* 40: 569-576
30. Morrissey, J. H. 1981. Silver stain for proteins in polyacrylamide gels: A modified procedure with enhanced uniform sensitivity. *Anal. Biochem.* 117: 307-310
31. Motallebi, M., M.R. Zamani and A. Hosseinzadeh Colagar. 2003. Relationship between polygalacturonase activity and pathogenicity among Iranian isolates of *Ascochyta rabiei*. *J. Sci & Technol. Agric & Natur. Resour.* 6(4): 159-169
32. Nene, Y.L., and M.V. Reddy. 1987. Chickpea diseases and their control. PP. 233-270. *In: M.C. Saxena and K.B. Singh. (Eds.), The Chickpea.* CAB International, Oxon, UK.
33. Newman, M.A., J. Conrads-Strauch, G. Scofield, M.J. Daniels and J.M. Dow. 1994. Defense related gene induction in *Brassica campestris* in response to defined mutants of *Xanthomonas campestris* with altered pathogenicity. *Mol. Plant Microbe Interact.* 7: 553–563.
34. Ori, N., Y. Eshed, G. Presting, D. Avov, S. Tanksley, D. Zamir and R. Fluhr. 1997. The 12C family from the wilt disease resistance locus 12 belongs to the nucleotide binding leucine-rich repeat super family of plant resistance genes. *Plant Cell.* 9: 521–532.
35. Pietro, A.D. and I.G. Roncero. 1996. Endopolygalacturonase from *Fusarium oxysporum* f.sp. *lycopersici*: Purification, Characterization, and Production During Infection of Tomato plants. *Phytopathol.* 86(12): 1324-1330.
36. Pressey, R. 1996. Polygalacturonase inhibitors in bean pods. *Phytochem.* 42: 1267–70
37. Salvi, G., F. Giarrizzo, G. De Lorenzo and F. Cervone. 1990. A polygalacturonase-inhibiting protein in the flowers of *Phaseolus vulgaris* L. *Plant Physiol.* 136: 513-518.
38. Shanmugam, V. 2004. Role of extracytoplasmic leucine rich repeat proteins in plant defence mechanisms. *J. Microbiological Res.* 09-014
39. Shieh, M.T., R.L. Brown, M.P. Whitehead, J.W. Cary, P.J. Cotty, T.E. Cleveland and R.A. Dean. 1997. Molecular genetics evidence for the involvement of a specific polygalacturonase, P2c, in the invasion and spread of *Aspergillus flavus* in cotton balls. *Appl. Environ. Microbiol.* 63: 3548–3552.
40. Sweetingham, M.W., R.H. Cruickshank and D.H. Wong. 1986. Pectic zymograms and taxonomy and pathogenicity of the ceratobasidiaceae. *Trans. Br. Mycol. Sci.* 86: 305-311
41. ten Have, A., W. Mulder, J. Visser and J.A. Van Kan. 1998. The endopolygalacturonase gene Bcpg 1 is required for full virulence of *Botrytis cinerea*. *Mol. Plant Microbe Interact.* 11: 1009–1016.
42. Toubart, P., A. Desiderio, G. Salvi, F. Cervone, L. Daroda, G. De Lorenzo, C. Bergmann, A.G. Darvill and P. Albersheim. 1992. Cloning and characterization of the gene encoding the endopolygalacturonase-inhibiting protein (PGIP) of *Phaseolus vulgaris* L. *Plant J.* 2: 367-373
43. Westermeier, R. 2000. *Electrophoresis in Practice, A Guide to Methods and Applications of DNA and Protein Separations.* 3rd ed., Wiley-Vch, New York.
44. Zamani, M.R., M. Motallebi and M.A. Arefpour. 2000. Comparative study of polygalacturonase activity from different Iranian isolates of *Fusarium oxysporum*. *Iranian J. Agric. Sci.* 31: 293-302.