

## مروری بر روش های تولید پروتئین های نو ترکیب درمانی در مخمر پیشیا پاستوریس

حمید بابولیان<sup>۱</sup>، علی محمد لطیفی<sup>۲\*</sup>، جعفر امانی<sup>۲\*</sup>، احسان صادق نژاد<sup>۱</sup>، فاطمه شاکری<sup>۱</sup>

<sup>۱</sup>دانشگاه علوم پزشکی بقیه الله (عج)، مرکز تحقیقات بیوتکنولوژی کاربردی، تهران، ایران.  
<sup>۲</sup>دانشگاه علوم پزشکی بقیه الله (عج)، مرکز تحقیقات میکروبیولوژی کاربردی، تهران، ایران.

### چکیده:

موفقیت سیستم های بیانی مخمر برای بیش از ۲۰ سال جهت تولید پروتئین های نو ترکیب امری اثبات شده است. استفاده از مخمر متیلوتروف *Pichia pastoris* به عنوان یک میزبان سلولی جهت بیان پروتئین های نو ترکیب در صنعت دارویی طی سالهای اخیر رشد چشم گیری داشته است. سیستم بیانی مخمر *Pichia pastoris* با دارا بودن مزایایی چون دستکاری ژنتیکی آسان، تراکم سلولی بالا نسبت به سلول های پستانداران، دارا بودن پتانسیل بالا جهت تولید پروتئین نو ترکیب فولد شده حامل تغییرات پس از ترجمه، وجود پروموترهای قوی جهت بیان حداکثری پروتئین نو ترکیب و الحاق DNA خطی خارجی حاوی چندین کپی از پروتئین هدف با فرایند نو ترکیبی همولوگی، این پتانسیل را جهت کاربرد گسترده در حوضه ی صنعتی و تجاری فراهم نموده است. هدف از این متن مروری، بررسی ویژگی های سیستم بیان مخمر *P.pastoris* از دیدگاه تجربی مهندسی ژنتیک، شیمیایی پروتئین و ملاحظات طراحی مولکولی می باشد که جهت بیان موفق پروتئین نو ترکیب مورد نظر ضروری هستند.

**کلید واژه:** *Pichia pastoris*، تولید پروتئین نو ترکیب، سیستم های بیانی

### مقدمه:

اوایل سال ۱۹۰۰ جهت تولید میزان زیادی از مواد شیمیایی مانند اسید سیتریک (۴۵) و استون و بوتانول (۴۱) به ترتیب صورت گرفت. از میان سیستم های مختلف تولید کننده پروتئینهای نو ترکیب، سیستم یوکاریوتی به دلیل تولید پروتئین های بزرگ به ویژه پروتئین های غنی از باند دی سولفیدی و تغییرات بعد از ترجمه بروی آنها نسبت به سیستم پروکاریوتی ترجیح داده میشود (۳۰). این در حالی است که سیستم های پروکاریوتیک جهت سنتز پروتئین های کوچک کارا تر است. در میان سیستم های بیان یوکاریوتی، مخمر دارای مزایای بیشتری نسبت به سایر سیستم های بیان میباشد که شامل رشد سریع سلولی، تولید سطوح بالای از رهاسازی پروتئین در محیط کشت، حذف اندوتوکسین و باکتریوفاژ، کمک به فولد شدن پروتئین، امکان دست ورزی ژنتیکی و کتور بیان، فقدان بیماری زاایی در انسان، صرفه جویی در هزینه، تنوع در تغییرات پس از ترجمه مانند گلیکوزاسیون، متیلاسیون، اسیلاسیون و ... و در نهایت توانایی برای جمع آوری پروتئینهای ترشح شده در محیط کشت، بدون آسیب به سلولهای میزبان میباشد (۷۱). امروزه بیش از ۲۰۰

پروتئین ها به عنوان یکی از مهمترین ماکرو مولکولهای عالم بیولوژیکی، در سیستم متابولیکی و کاتابولیکی موجودات زنده نقش مهمی را ایفا می کنند که می توان به درگیری آنها در فرایندهای مهم سلولی از جمله سیگنالینگ سلولی، چسبندگی سلولی، پاسخ های ایمنی و تقسیم سلولی اشاره نمود (۹۶). امروزه تولید تجاری پروتئینها در صنایع آنزیمی، کشاورزی و دارویی با تکیه بر مهندسی پروتئین و مهندسی ژنتیک در حال گسترش است به طوریکه محصولات تولید شده در این صنایع بخش مهمی از نیازهای جوامع را در بر میگردد. در سال ۱۹۲۲ اولین پروتئین دارویی با نام انسولین توسط Banting و همکاران کشف گردید (۴) و به دنبال آن دوره بیوتکنولوژی مدرن با تاسیس Cetus Corporation در کالیفرنیا در سال ۱۹۷۱ شروع گردید. فرایند تخمیر میکروبی در شرایط هوازی و بی هوازی از

آدرس نویسنده مسئول: دانشگاه علوم پزشکی بقیه الله (عج)، مرکز تحقیقات بیوتکنولوژی کاربردی، تهران، ایران  
Email: amlatify@yahoo.com

تاریخ دریافت مقاله: ۹۲/۴/۱۷

تاریخ پذیرش: ۹۲/۶/۱۳

پزشکی ایفا میکنند پرداخته شده است.

Protein	Indication	Reference
Angiostatin	Antiangiogenic factor	[۱۲۲۱۲۷]
Elastase inhibitor	Cystic fibrosis	[۱۲۵]
Endostatin	Antiangiogenic factor	[۷۲]
Epidermal growth factor analog (EGF)	Diabetes	[۹۱،۲۰]
Insulin-like growth factor-1 (IGF-1)	Insulin-like growth factor-1 deficiency	[۱۰۲]
Human serum albumin	Stabilizing blood volume in burns/shock	[۶۶]
Kallikrein inhibitor ecallantide or kalbitor	Hereditary angioderma	[۲۸]
Human hepatocyte growth factor (HGF)	Mitogen for hepatocytes	[۷۴]
keratinocyte growth factor-2 (KGF-2)	Vertebrate organogenesis	[۱۱۷]
Human Granulocyte-colony stimulatory factor (HGF)	Hematopoietic growth factor	[۴]
Human bone morphogenetic protein-6 (BMP-6)	Osteogenesis	[۳۲]
Antigen ligA and lipL32 of leptospira	Leptospirosis vaccine candidate	[۴۶]

جدول ۱. معرفی تعدادی از پروتئین های نوترکیب تولید شده در مخمر *P. pastoris*. ستون اول نام پروتئین نوترکیب ذکر شده و در ستون دوم عملکرد پروتئین نوترکیب نشان داده شده است.

#### *Pichia Pastoris* یک مخمر متیلوتروف:

جنس های محدودی از مخمر شامل *Hansenula*، *Candida*، *Trulopsis* و *Pichia* در بین جنس های مختلف آن در مسیرهای متابولیک سلولی خود از متانول به عنوان تنها منبع کربنی مورد نیاز استفاده می کنند (۳۶)، که از آنها با نام مخمرهای متیلوتروف یاد میشود. استفاده از متانول با هدف تنظیم بیان ژنهای مخمرهای متیلوتروف در سطح رونویسی، می تواند در کنترل سرعت و میزان سنتز آنزیم های تولیدی موثر واقع شود (۶۲). وجود قویترین پروموتورهای کنترل کننده بیان در ژن های مخمری، یک پتانسیل حداکثری

پروتئین و پلی پپتید با خاصیت دارویی در لیست FDA به چشم می خورد که بعضی از آن ها شامل انسولین انسانی، آلبومین، هورمون رشد انسانی (HGH)، فاکتور VIII و غیره می شود (۳۰). در سال ۲۰۰۴ هزینه ی پروتئین نوترکیب درمانی در بازارهای جهانی معادل ۴۴ بیلیون دلار بوده است که تا انتهای سال ۲۰۱۰ بالغ بر ۷۰ بیلیون دلار آمریکا صرف هزینه ی این ترکیبات دارویی شد (۸۷). امروزه تولید پروتئین های نوترکیب از طریق مهندسی زیستی در سیستم های بیان مخمری مانند *P. pastoris* به صورت قابل توجهی گسترش یافته است. مهمترین ملاحظات برای بهبود و کارایی سیستم بیانی پروتئین های نوترکیب در *P. pastoris* شامل طراحی وکتور، فولدینگ پروتئین در شبکه آندوپلاسمی، گلیکوزیلاسیون صحیح، سکانس سیگنال ترشحی، دوز ژنی و بهینه سازی فرآیند تخمیر می شود (۲۸). در کل مهندسی مکانیسمهای ترشح پروتئین در *P. pastoris* منجر به افزایش بازدهی عملکردی پروتئین های نوترکیب می شود.

#### تاریخچه ی تولید پروتئین های نوترکیب دارویی در *Pichia pastoris*:

پروتئین های نوترکیب پستانداران در مقیاس گسترده توسط *P. pastoris* تولید شده و به محیط خارج سلولی ترشح می شود. کمترین مورد گزارش شده با میزان ۱،۵ گرم بر لیتر جهت تولید یک پیش ساز انسولین توسط Wang و همکاران در سال ۲۰۰۱ (۱۱۵) صورت گرفته است. گزارش های دیگر شامل ۴ گرم بر لیتر اینترلوکین داخل سلولی به عنوان ۳۰ درصد پروتئین و ۴ گرم بر لیتر ترشح سرم آلبومین انسان (۲۵) ، ۶ گرم بر لیتر از فاکتور نکروز تومور (۲۶) ، پروتئین های هترولوگ (۷۵) و ۱۰ گرم بر لیتر از فاکتور نکروز تومور (۱۰۳) می باشد. تولید سرم آلبومین در مخمر *P. pastoris* تقریباً ۶۷ برابر *S. cerevisiae* (۱۰ / ۰،۱۵ گرم بر لیتر) می باشد (۸۰) ژلاتین تولید شده در *P. pastoris* بیش از ۱۴ گرم بر لیتر (۱۱۹) گزارش شده است. شواهد حاکی از آن است که *P. pastoris* به صورت حداکثری می تواند ۲۰-۳۰ گرم بر لیتر پروتئین نوترکیب تولید کند (۷۸). در جدول ۱ به اختصار در مورد تعدادی دیگر از پروتئین های تولید شده توسط مخمر *P. pastoris* که امروزه نقش مهمی را در زمینه بیوتکنولوژی

را برای تولید صنعتی پروتئینهای نو ترکیب از طریق الفای قابل تنظیم متانول فراهم کرده است (۲۳،۳۴). به عنوان یک مثال، مشتقات حاصل از ژن الکل اکسیداز (AOX1) با استفاده از مسیر متانول، منجر به شناخت پروموتور AOX1 شده است که به عنوان یکی از قوی ترین پروموتورهای تنظیم کننده یوکاریوتی معرفی می شود. متابولیسم متانول در مخمرهای متیلوتروف با هدف تنظیم بیان ژن، از طریق اکسیداسیون آن به فرمالدهید و پراکسید هیدروژن (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) توسط آنزیم الکل اکسیداز انجام میپذیرد (۲۲). این واکنش به دلیل جلوگیری از آسیب های وارده توسط پراکسید هیدروژن، درون یک اندامک سلولی بنام پر اکسی زوم انجام می شود (۲۳). میزان افینیتی آنزیم الکل اکسیداز نسبت به اکسیژن ناشی از تجزیه پر اکسید هیدروژن بسیار کم است بنابراین مخمر بیان ژن AOX1 را افزایش می دهد (۳۴). این فرایند مهم سلولی در مخمر به منظور استفاده از پروموتور ژن AOX1 برای بیان پروتئین های نو ترکیب پیشنهاد میشود (۳۴،۲۴). طیف گسترده ای از پروتئین های نو ترکیب با استفاده از این پروموتور در عملکرد های متنوع از ۵،۱ گرم بر لیتر (یک پیش ساز انسولین) (۱۱۵) تا ۲۰-۳۰ گرم بر لیتر (۷۸) تولید شده اند. مخمر *P. pastoris* در حالت رویشی به صورت هاپلوئید وجود دارد و در صورت محدودیت نیتروژن منجر به تکثیر جنسی و تشکیل سلول دیپلوئید می شود. از آنجا که این مخمر به صورت هموتال می باشد انجام کراسینگ ژنتیکی جهت تشکیل سویه جدید، نیازمند نشانگر مکمل برای رشد انتخابی سلول دیپلوئید می باشد (۵۷). سرعت در تراکم بالای رشد مخمرها، یکی دیگر از دلایلی است که کاربرد مخمرهای متیلوتروفیک را در حوضه ی صنعت بسیار افزایش داده است (۷۱،۳۷). از طرف دیگر تولید پروتئین ها با پیوند دی سولفیدی زیاد یا پروتئین های گلیکوزیله یا فسفریله شده، برداشته شدن متیونین از انتهای آمینی پروتئین، اولیگومریزه شدن پروتئین هدف و ترشح آن در حالت محلول به محیط کشت، بخوبی در سیستم میکروارگانیسم *Pichia Pastoris* اثبات شده است (۸۴،۱۲۰).

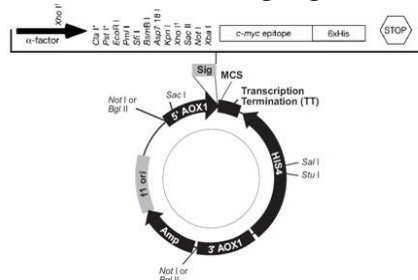
**مخمر *Pichia pink* در مقایسه با *Pichia pastoris***  
سویه های *P.pink*، مخمرهای موتاسیون یافته از *P.pastoris* هستند که جهت تولید سطح بالایی از پروتئین های نو ترکیب

برای سطوح آزمایشگاهی و صنعتی طراحی شده اند (۶۱). این مخمرها متیلوتروفیک هستند بطوریکه می توانند از متانول بعنوان تنها منبع کربن استفاده کنند. مخمرهای متیلوتروفیک علاوه بر دارا بودن مزایایی از جمله سطح بالای بیان، محیط کشت ارزان، عدم نیاز به سرم، سهولت در افزایش مقیاس تولید و القاء کنترل شده، می توان به پردازش پس از نسخه برداری و ترجمه در این سیستم یوکاریوتی اشاره نمود که این سیستم را برای تولید بالای پروتئین های نو ترکیب یوکاریوتی منحصر بفرد می سازد (۲۷،۷۰،۱۷). تمام سویه های *P.pink* فاقد ژن کد کننده آدنین هستند، بنابراین این سلولها نمی توانند روی محیط کشت های حداقل یا فاقد آدنین رشد نمایند (۶۱). علاوه بر این، فقدان ژن ADE2 هنگام رشد مخمر موجب افزایش پیش سازهای نوکلئوتیدهای پورین در واکوئل های سلولهای مخمر می گردد (۷۰) و نتیجه ی آن حضور کلنی های صورتی رنگ می باشد. این در حالی است که سلولهای مخمر دارای این ژن، هنگام کشت روی محیط های حداقل یا فاقد آدنین، کلنی های سفید رنگ ایجاد می نمایند. در یک مقایسه کلی، مخمر *P.pastoris* توانسته موفقیت زیادی در تولید بیشتر پروتئین های نو ترکیب ایجاد نماید (۳۹-۱۱۲)، با این وجود هنوز پتانسیل افزایش و تقویت سیستم بیانی مخمر *P.pastoris* حائز اهمیت است که می تواند در تولید حداکثری پروتئین هدف مورد توجه قرار گیرد.

### سیستم بیان پروتئین نو ترکیب در مخمر *Pichia Pastoris*:

مهندسی ژنتیک به عنوان یک ابزار نوین در تولید پروتئین های نو ترکیب توانسته است میزان زیادی از نیازهای صنعت را فراهم نماید (۲۹). مخمر *Pichia pastoris* به عنوان یک یوکاریوتی، بسیاری از مزایای سیستم های بیان یوکاریوتی مانند پردازش پروتئین، فولدینگ پروتئین، و تغییرات پس از ترجمه را دارا می باشد (۳۰)، این در حالی است که به سادگی مانند باکتری *E. coli* و یا ساکارومیسس سرویزیه قابل دست ورزی می باشد (۱،۲،۳). سیستم بیان مخمر *Pichia pastoris*، سریع تر، آسان تر و ارزان تر برای استفاده نسبت به دیگر سیستم های بیان مانند baculovirus و یا کشت بافت پستانداران می باشد و به طور کلی سطوح بالاتری از بیان را نیز نشان می دهد (۲۵).

گرفت. این روش اجازه می دهد تا ترانسفورمانت های His<sup>+</sup> که دارای مقاومت به سطح بالایی از آنتی بیوتیک می باشند انتخاب شده که شامل نسخه های متعددی از وکتور بیان باشند (۹۵). یکی از خصوصیات عمده مشترک در وکتورهای بیانی مخمر *P.pastoris* حضور یک کاست بیانی است که متشکل از توالی پروموتور (عمدتا پروموتور AOX1)، توالی خاتمه رونویسی (مشتمل شده از AOX1) و بین آنها ناحیه single یا multiple کلونینگ سایت برای ورود ژن خارجی میباشد. توالی خاتمه رونویسی در ناحیه ی ۳' از طریق پلی آدنیلاسیون مولکول mRNA را سازماندهی می کند که در فرایند بیان مخمر اهمیت ویژه ای دارد (۵۰). طراحی کاست بیانی به منظور ایجاد محصولات رونویسی 5' UTR-ORF-3' Cap-AOX1 UTR-PolyA با هدف تشکیل ساختار mRNA بالغ صورت می گیرد که بایستی دارای توالی های رمزکننده باشد به طوریکه سلول مخمر توانایی تولید mRNA پایدار با بهره بری ترجمه کارا را داشته باشد (۹۳). ورود یک توالی کد کننده خارجی به داخل وکتور بیانی معمولاً در *E.coli* نیز انجام می شود (۶۳، ۷۹، ۱۱۱). بنابراین همه وکتورهای بیانی *P.pastoris* به صورت شاتل وکتور (*E.coli/P.pastoris*) طراحی شده اند. از طرف دیگر کاست بیانی آنها همچنین محتوی یک منشاء همانندسازی برای حفظ پلاسمید در باکتری همراه با مارکرهای انتخابگر برای ترانسفورماسیون وکتور در هر دو ارگانیسم است. در برخی موارد، وکتورها محتوی یک فراگمنت منشاء گرفته از توالی AOX1 3' میباشند که می تواند همراه با توالی پروموتور AOX1 برای انجام جایگزینی ژن AOX1 استفاده شود (۷۱). در وکتورهای بیانی *P.pastoris* نیازمند اجزایی می باشد که در جدول ۲ به تفصیل بیان شده است.



تصویر ۱. شکل شماتیک از وکتور بیان *P.pastoris* که بیانگر قسمتهای مختلف می باشد.

به عنوان مثال تولید پروتئین به صورت اینکلوژن بادی یا فولد شدن نامناسب پروتئین به عنوان یک مشکل در سیستم بیان باکتریایی تلقی می شود (۴۹). در یک مقایسه دیگر، سیستم بیانی مخمر *P.pastoris* با دستکاری مولکولی و ژنتیکی قادر است که به میزان 10 تا 100 برابر، سطح بیان پروتئین هترولوگ را نسبت به مخمر ساکارومیسس سرویزیه افزایش دهد (۱۱). اضافه بر این سیستم بیان *P.pastoris* به صورت کیت بیان برای استفاده تحقیقاتی از شرکت Invitrogen در دسترس می باشد (۵۶). با توجه به مطالعات انجام شده اولین پلی پپتید درمانی بیان شده توسط *P.pastoris*، با نام ecallantide (۶۰) اسید آمینه) توسط FDA در سال ۲۰۰۹ مورد تایید قرار گرفت (۱۳۱) و توسط شرکت Dyax (کمبریج، MA) به منظور درمان آنژیوادم ارثی تولید شد.

#### ۵-۱ ویژگی ها و خصوصیات وکتور بیانی:

تعداد زیادی از وکتورهای تجاری جهت بیان پروتئین های خارجی در *P.pastoris* وجود دارد که امروزه با توجه به هدف مورد نظر در حال استفاده می باشد. در تصویر ۱ یک نمونه از وکتور بیانی نشان داده شده است. از آنجا که برخی از وکتورها شامل یک توالی کدکننده از سیگنال ترشچی در بالادست ناحیه سایت کلونینگ چندگانه (Multiple cloning site) نمی شود، این وکتورها را می توان برای ترشحات داخل سلولی استفاده نمود (۹۳). البته این نکته قابل ذکر می باشد که کلونینگ پروتئین مورد نظر همراه با سیگنال ترشح مادری در وکتور می تواند در بیان خارج سلولی نقش داشته باشد. وکتورهای دیگر شامل یک توالی کدکننده از توالی سیگنالی مانند alpha-mating factor ( $\alpha$ -MF) و سیگنال ترشچی (PHO1) Phosphatase می باشد که نتیجه آن در ترشح ژن مورد نظر می باشد. نسل اول از وکتورهای بیانی در *P.pastoris* (مانند pHIL-D2 or pPIC9) شامل ژن هیستیدین دهیدروژناز (HIS4) می باشند که می تواند به عنوان یک نشانگر انتخابی از طریق ترانسفورماسیون به *P.pastoris* ادغام شود (۷۳). به منظور دستیابی به سطح بیان بالایی از پروتئین مورد نظر در ترانسفورمانت های His<sup>+</sup>، نیاز به آزمایشات و تحقیقات بیشتر از طریق ادغام چند نسخه ای کاست بیان می باشد (۲۵). در نتیجه وجود یک ژن مقاومت به آنتی بیوتیک برای تولید وکتور pPIC9K مورد استفاده قرار

جدول ۲. اجزای موجود در وکتور بیان *P. pastoris* و توصیف نقش آنها

ویژگی	توصیف	مزیت
AOX1 <sup>+</sup> 5'	یک قطعه bp ~ ۱۰۰۰ حاوی پروموتور AOX1	اجازه دادن متانول القایی برای بیان در سطوح بالا از <i>Pichia</i> و تلفیق پلاسمید هدف به لوکوس AOX1
Sig	توالی DNA کد کننده برای یک سیگنال ترشعی پروتئین N ترمینال.	پروتئین های مطلوب هدف برای ترشح
MCS	سایت چندگانه کلون	محل تلفیق ژن مورد نظر به وکتور بیان
TT	سیگنال انتهای رونویسی و سیگنال پلی آدنیلایسون از ژن AOX1 (~260 bp)	انجام عملیات ختم رونویسی و پلی آدنیلایسون mRNA
a-Mating Factor	سیگنال ترشعی	ترشح پروتئین نوترکیب
HIS4	نوع وحشی ژن <i>Pichia</i> برای هیستیدینول دهیدروژناز (~۲.۴ kb) و قابل استفاده برای نژادهای <i>Pichia his4</i>	یک نشانگر انتخابی برای جداسازی سویه های نوترکیب <i>Pichia</i>
3' AOX1	توالی از ژن AOX1 با فاصله نسبتاً زیاد به توالی TT (~650 bp)	تلفیق پلاسمید هدف به لوکوس AOX1
Amp	ژن مقاومت به آمپلی سیلین	مارکر انتخابی
BR322 origin	نقطه شروع همانند سازی در <i>E. Coli</i>	عمل همانندسازی و حفاظت در باکتری
fl origin	ناحیه fl به عنوان نقطه شروع همانندسازی در باکتریوفاز	تکثیر DNA تک رشته ای برای انجام موتاسیون
Not I Bgl II Sac I Sal I Stu I	مکان های اختصاصی برش برای آنزیم های محدود کننده	خطی شدن وکتور جهت تلفیق در ژنوم <i>Pichia</i>

حضور القاگر متانول سبب مهار رونویسی شده، به همین دلیل برای القاء مطلوب با متانول، رشد بر روی گلیسرول قابل توصیه می باشد (۶۲،۸۳،۱۲۹)، البته رشد در حضور تنها گلیسرول به عنوان یک عامل رها ساز برای بیان حتی سطوح پایین از بیان ژن AOX1 قابل توصیه نیست و حضور متانول جهت القاء لازم است (۳۴،۶۸). اگر چنانچه فعالیت ژن AOX1 از دست رود و بیان الکل اکسیداز سلولی دچار نقصان شود نتیجه ی آن ایجاد یک نژاد فنوتیپی Mut<sup>S</sup> (Methanol utilization slow) می باشد که به صورت - Mut نمایش داده می شود. این سلولهای مخمر قادر به استفاده متانول جهت بیان ژن نمی باشند (جدول ۳). علاوه بر این، سلول ها با نماد Mut + اشاره به نوع وحشی سویه های مخمری دارد که از متانول به عنوان تنها منبع کربن استفاده می کنند (۲۳،۶۸). جدول ۳. ویژگی های ارزیابی شده برای نژاد های فنوتیپی مختلف از *P. pastoris*. در ستون اول نوع فنوتیپ، در ستون دوم انواع مختلف ژن AOX، در ستون سوم میزان متانول باقی مانده در محیط، ستون چهارم نرخ اختصاصی رشد در ساعت و در ستون آخر نرخ تغذیه متانول ذکر شده است.

جدول ۳. مشخصات سویه های مختلف مخمر *P. pastoris*

Strain type	AOX gene	Residual methanol (%)	Specific growth rate (h <sup>-1</sup> )	Methanol feeding rate
Mut <sup>+</sup>	AOX <sub>1</sub> <sup>+</sup> AOX <sub>2</sub> <sup>+</sup>	<0.5	0.14	+++
Mut <sup>S</sup>	AOX <sub>1</sub> <sup>-</sup> AOX <sub>2</sub> <sup>+</sup>	0.2-0.8	0.04	++
Mut <sup>-</sup>	AOX <sub>1</sub> <sup>-</sup> AOX <sub>2</sub> <sup>-</sup>	0.5	0	-

در مواردی که پروموتور AOX1 مناسب نباشد پروموتورهای دیگر شبیه GAP، FLD1، PEX8 و YPT7 استفاده می شوند (۷۰) (جدول ۴). در مورد پروموتور GAP باید گفت که از ژن گلیسرآلدهید ۳ فسفات دهیدروژناز مخمر مشتق شده است. مزیت استفاده از این پروموتور این است که متانول برای القای آن لازم نیست و برای استفاده از یک منبع کربن دیگر نیازی به تغییر کشت نمی باشد (۱۱۸). علاوه بر این، رشد سویه و بیان ژن را مرسوم تر، آسان تر و مستقیم تر می سازد. پروموتور GAP برای کاربردهای مختلف استفاده می شود که از آن جمله، به دلیل عدم حضور القاگر متانول، به منظور تولید محصولات در صنایع غذایی کاربرد دارد. در سیستم بیانی GAP، پروتئین

## ۵-۲ پروموتورهای کاربردی در وکتورهای بیانی *Pichia pastoris*

در مخمر *P. pastoris* دو ژن جهت کد کردن پروتئین الکل اکسیداز با نام های AOX1 و AOX2 وجود دارد. محصول ژن AOX1 برای اکثر فعالیت های الکل اکسیداز در سلول مورد استفاده قرار می گیرد (۲۳). بیان ژن AOX1 به شدت تحت تنظیم و کنترل متانول می باشد به طوری که بالغ بر 30 درصد از کل پروتئینهای محلول در سلول در اثر حضور متانول بیان می شوند. این در حالی است که AOX2 در حدود 97٪ با AOX1 همولوگ می باشد اما بیان آن در حضور متانول بسیار کندتر از بیان ژن AOX1 می باشد (۶۸، ۲۳). در مورد بیان ژن AOX1 این نکته قابل ذکر است که در تنظیم آن در سطح رونویسی نیازمند یک فرایند ۲ مرحله ای است که شامل فرایند مهار/ رها سازی و یک مکانیزم القاء می باشد (مانند ژن GAL1 در ساکارومیسس) (۵۹، ۱۱۰). این در مخمرهای رشد یافته در حضور متانول، حدود ۵٪ از polyA + RNA از طریق بیان ژن AOX1 می باشد. به طور خلاصه، رشد در برابر گلوکز با وجود



استفاده می شوند، بلکه برای اطمینان از بقاء پلاسمید در طی روند تناوب نسل استفاده می شوند. از مارکرهای انتخاب غالب می توان به ژن های مقاومت به مس (۳۵) و برخی از آنتی بیوتیک ها شامل کلرامفنیکل (۵۸)، هیگرومایسین (۴۰) و ژئوسین (۸۸) اشاره نمود. مارکرهای انتخابی اکسوتروف شامل HIS3، HIS4، LEU2، LYS2، TRP1 و URA3 برای تکمیل یک موتاسیون اکسوتروف خاص در سویه میزبان طراحی می شوند که برای مخمر *P.pastoris* ژن های HIS4 و مقاومت به ژئوسین معمولا استفاده می شوند (۸۸،۴۰).

جدول ۴. پروموتورهای کاربردی در مخمر *Pichia pastoris*

Promoter	Regulation	Reference
AOX1	Inducible (methanol)	[۱۱۰]
FLD1	Inducible (methanol, methylamine)	[۹۷]
GAP	Constitutive	[۹۷]
PEX8	Inducible (methanol, oleate)	[۶۰]
YPT1	Constitutive	[۹۵]

### ۳-۵ سیگنال پپتید:

پروتئین های نوترکیب از طریق سیگنال پپتید می توانند از مسیر ترشحی عبور کنند و دچار تغییرات بعد از ترجمه شوند که ممکن است برای عملکرد پروتئین ضروری باشد (۵۴). مطالعات Plantz و همکاران (۲۰۰۶) نشان داده است که بالغ بر ۵۰۰ پروتئین نوترکیب در سیستم بیانی مخمر *P. pastoris* تولید شده است (۸۹) که توسط سیگنال پپتید به درون محیط انتقال داده می شود. مزیت عمده برای بیان پروتئینهای هترولوگ به عنوان پروتئین های ترشحی در مخمر *P. pastoris* این است که سطوح بسیار پایین از پروتئین های بومی نسبت به پروتئینهای هترولوگ در مخمر *P. pastoris* ترشح می شوند (۷۵). از آنجایی که در محیط کشت رشد حداقل *Pichia* میزان کم پروتئین وجود دارد این بدان معنی است که ترشح پروتئین هترولوگ شامل اکثریت قریب به اتفاق از کل پروتئین می باشد که به عنوان اولین گام در تخلیص پروتئین قابل ذکر می باشد (۶). علاوه بر این، ترشحات خارج سلولی، از اثرات زیان آور بیان بیش از حد پروتئین های داخل سلولی پیشگیری می کند (۶۵). در برخی از موارد، از آنجایی که *P. pastoris* به عنوان یک سیستم بیانی وسیع مورد استفاده قرار گرفته است، توالی سیگنال کوتاه جهت ترشح کارآمد پروتئین های

هترولوگ کلون شده همراه با رشد سلول بیان می شود (۲۱) که این سیستم نیاز به هیچ شستشو برای برداشتن منبع کربن غیر متانول ندارد و بنابراین سیستم بیان GAP ممکن است به میزان قابل توجهی برای گسترش روش های مقرون به صرفه جهت تولید مقیاس بزرگ از پروتئین های هترولوگ استفاده شود (۱۱۳). برای بیان پروتئین های نشاندار شده جهت مطالعات NMR از کشت محدود به منبع کربن تک استفاده می شود که به دلیل پیوستگی بیان پروموتور GAP، این پروموتور یک انتخاب خوب برای تولید پروتئین هایی که ممکن است برای مخمر سمی باشند نیست (۱۲۶). پروموتور FLD1 از آنزیم گلوکاتینون وابسته به دهیدروژناز فرمالدهید از مخمر *P.pastoris* مشتق شده است که توسط متانول به عنوان منبع کربن و آمین های الکلی مانند متیل آمین به عنوان منبع نیتروژن القا می شود (۹۷). بنابراین پروموتور FLD1 انعطاف پذیری بالایی از القای بیان پروتئین با متیل آمین که یک منبع نیتروژن ارزان است را نشان می دهد. پروموتورهای PEX8 (۶۰) و YPT1 (۹۵) در مواقعی که سطح بیان متوسط مورد نیاز است به کار برده می شوند. ژن PEX8 یک پروتئین ماتریکس پروکسی زومال را کد می کند که مورد نیاز برای تکامل پراکسی زوم می باشد. شواهد حاکی از آن است که سطح بیان در پروموتور PEX8 با القا متانول به طور قابل توجهی پایین تر از پروموتورهای AOX1 و FLD1 است. در صورتی که ژن YPT1 یک GTPase درگیر در ترشح را کد می کند. این پروموتور یک سطح پایین اما پیوسته از بیان را در محیط محتوی گلوکز، متانول یا مانیتول به عنوان تنها منبع کربن YPT1 فراهم می کند (۹۵). پروموتور ترکیبی AOX1 و GAP یکی دیگر از انواع پروموتورهاست که برای بیان همزمان پروتئین های نوترکیب گسترش یافته و از طریق افزایش سطح بیان پروموتور GAP صورت می گیرد (۱۲۱). متانول در القای پروموتور GAP و القای پروموتور AOX1 نقش مهمی را ایفا می کند که در صورت عدم وجود گلوکز، میزان اثر آن در تولید پروتئین ترشحی مورد نظر به میزان ۲ برابر در پروموتور GAP بیشتر از پروموتور AOX1 می باشد. اخیرا در طی روند ترانسفورماسیون از الکتروپوریشن بخاطر آسانی آن و لیتیوم استات برای صرفه جویی در هزینه های آن استفاده می شود (۱۰۵). علاوه بر این، مارکرهای انتخابی نه تنها جهت گزینش ترانسفورمانت ها

نوترکیب به کار برده می شود. از آنجایی که کارایی پپتیدهای سیگنال ترشچی می تواند در ترشح پروتئین های نوترکیب متفاوت باشند، تنوع دسترسی به سیگنال های پپتیدی اهمیت زیادی دارد. از طرف دیگر، برای شناسایی سیگنال ترشچی بهینه در هر پروتئین نوترکیب، غربالگری سیگنال پپتید برای بالاترین ظرفیت ترشح می تواند انجام شود (۶۷). Brockmeier و همکاران در سال ۲۰۰۶ (۹) یک کتابخانه سیگنال پپتیدی ایجاد کردند که می تواند یک ابزار قدرتمند برای بهینه کردن ترشح پروتئین نوترکیب در باکتری گرم مثبت باشد.

سیگنال پپتیدها با کارکرد انتقال پروتئین را می توان به دو دسته مجزا شامل همزمان با ترجمه (Cotranslational) و پس از ترجمه (Posttranslational) تقسیم کرد که در مورد اولی، پیش پروتئین همزمان با عمل ترجمه به شبکه آندوپلاسمی انتقال داده می شود (۷،۶۴). اما در Posttranslational، پیش پروتئین به طور کامل سنتز می شود و از ریبوزوم قبل از انتقال به شبکه آندوپلاسمی آزاد می شود (۱۰) به عنوان مثال، a-Mating Factor Leader (a-MF) به عنوان یک سیگنال پپتید posttranslational طبقه بندی می شود (۸۱). در مسیر پس از ترجمه، سنتز کامل پروتئین در سیتوپلاسم می تواند مشکلاتی را برای پروتئین های خاصی به همراه داشته باشد. پلی پپتیدهای تازه ساخته شده باید در یک ساختار unfold یا تا حدی فولد، قبل از انتقال از طریق غشای شبکه آندوپلاسمی حفظ شوند (۸۶). اما این امکان وجود دارد که برخی پلی پپتیدها به صورت misfold مانده و تجمع یابند و حتی فولد شدن در سیتوپلاسم به حالت اصلی خود نیز صورت گیرد، که این مانع شناسایی توالی سیگنال پپتیدی و انتقال آن از طریق پروتئین ترانس لوکان Sec61 می شود (۱۰۸). اگرچه در بعضی موارد از فولدینگ و تشکیل باندهای دی سولفیدی به عنوان یک قدم محدودکننده در تولید پروتئین های خارجی یاد می شود (۵۱). مطالعات حاکی از آن است که توالی a-Mating Factor Leader در بسیاری از وکتورهای بیانی مخمر *P. pastoris* به طور گسترده برای ترشح پروتئین های هترولوگ استفاده می شود (۲۷). علاوه بر این یک توالی سیگنالی اسید فسفاتاز (PHO1) در مخمر *P. pastoris* شناسایی شده (۱۷) که قادر بوده است پروتئین پوشش G2 از ویروس HanTaan را به محیط کشت

سویه KM71 از مخمر *P. pastoris* (۴۲) ترشح کند. اگرچه مطالعات نشان دادند که استفاده از a-MF به عنوان سیگنال پپتید حتی می تواند منجر به ترشح مقدار بالاتری از پروتئین نوترکیب شود اما استفاده از سیگنال پپتید بومی پروتئین مورد نظر و جستجو برای توالی سیگنال پپتید ترشچی با کارایی بالا نیز نباید نادیده گرفته شود (۲۸). به عنوان یک مثال دیگر، توالی سیگنال فیتوهماگلوتینین (PHA-E) در لوبیای فازنولوس ولگاریس شناسایی شده است (۹۰) که این توالی سیگنالی به جای توالی سیگنال a-MF برای ترشح فیتوهماگلوتینین، snowdrop lectin و پروتئین فلورسانس سبز مورد استفاده قرار گرفته است (۹۰). اخیراً یک آنالیز پروتئومیک از پروتئین های ترشح شده توسط یک سویه وحشی *P. pastoris* تحت القای متانول انجام شده است (۵۳). در این مطالعه ۳۷ پروتئین با خاصیت ترشچی طبیعی گزارش شده است که می توانند کاندیدای خوبی برای غربالگری سیگنال پپتیدها برای ترشح پروتئین در *P. pastoris* باشند.

#### ۴-۵ دوز ژنی:

تعدادی از عوامل به طور بالقوه می تواند در نتیجه بیان پروتئین هترولوگ در *P. pastoris* تاثیر بگذارد که از آن جمله می توان به خواص توالی نوکلئوتید (به عنوان مثال ترکیب کدون، محتوای AT و ساختار ثانویه)، نحوه الحاق توالی به ژنوم، انتخاب سویه های میزبان، نحوه بیان، استفاده از متانول و شرایط کشت اشاره کرد (۱۷،۱۰۲). با این حال می توان اظهار داشت که بیان پروتئین از تنها یک نسخه ژن نوترکیب، یک عامل محدودکننده در تولید پروتئین است. از این رو پیشنهاد شده است که قرار دادن چند نسخه ژن نوترکیب می تواند با هدف به دست آوردن حداکثر بازده پروتئین انجام شود (۹۴). علاوه بر بهینه سازی کدون ژن هترولوگ، تعداد کپی ژن یکی از پارامترهای مهم به شمار می رود که باید در هنگام بیان و ترشح پروتئین نوترکیب در *P. pastoris* مورد ارزیابی قرار گیرد. در مخمر *P. pastoris*، ادغام کاست بیان به داخل ژنوم ارگانسیم یک روش بسیار کارآمد تلقی می شود که سبب تشکیل یک کلون بسیار پایدار شده و نیاز به فشار ثابت انتخاب را حذف می کند. با استفاده از این روش می توان گونه های که حاوی یک یا چند نسخه از کاست بیانی هستند را تولید کرد (۱۳۰). مطالعات

در کشت فرمانتور مورد ارزیابی قرار می گیرند.

#### ۵-۵ گلیکوزیلاسیون:

گلیکوزیلاسیون فراوان ترین تغییر در حال اتفاق در همه ی سلسله های موجودات زنده است (۶۹) و ممکن است که محلولیت، فولدینگ، حساسیت به پروتولیز، پایداری، اتصال به رسپتور و فعالیت در شرایط *in vivo* پروتئین را تحت تاثیر قرار دهد (۳۱،۱۲۴). تقریباً تمام پلی پپتیدهای رها شده در یوکاریوت ها گلیکوزیله هستند به طوریکه گلیکوزیلاسیون با توجه به نوع گونه، بافت و سلول متفاوت است (۸۴). حدود ۷۰ درصد از پروتئین های درمانی را گلیکو پروتئین ها تشکیل می دهند بنابراین گلیکوزیلاسیون صحیح پروتئین ها در کارایی پروتئین بسیار مهم می باشد چرا که گلیکوزیلاسیون غیر انسانی می تواند نیمه عمر پروتئین را کاهش دهد و یک پاسخ ایمنوژنیک نسبت به کربوهیدرات خارجی ایجاد نماید (۴۷). در برخی موارد، یک پروتئین به طور معمول بدون گلیکوزیله فعال است که ۷-۹ اینترفرون یکی از آنها می باشد (۹۲). در مواردی که گلیکوزیلاسیون برای پایداری و یا فولدینگ مناسب لازم است (به عنوان مثال، اریتروپویتین و کوریونی گنادوتروپین انسانی)، عمل گلیکوزیلاسیون اغلب می تواند توسط مخمر *P. pastoris* انجام شود (۴۴). عمل گلیکوزیلاسیون در توالی اولیه پروتئین در سایت (Asn-X-Ser/Thr) رخ می دهد و پروتئین ترشح شده پستانداران از طریق اتصال کووالانسی قند D-مانوز با آسپاراژین متصل به N-استیل D-glucosaminemolecules- گلیکوزیله می شوند (۶). آنزیم های قارچی نیز اغلب به همین نوع گلیکوزیله می شوند، اگر چه گاهی اوقات کربوهیدرات اضافی متصل شده به اکسیژن موجود در سرین یا ترئونین در پروتئین قارچی مشاهده می شود (۸۲). در یوکاریوت ها گلیکوزیلاسیون پروتئین ها به صورت شایع بعد از عمل ترجمه و قبل از ترشح می باشد، اما تفاوت های مهمی بین یوکاریوت ها در نوع قندهای اضافه شده در طول گلیکوزیلاسیون وجود دارد. برای مثال *P. pastoris* قادر به اضافه کردن هر دو بخش O و N کربوهیدرات به پروتئین های ترشحاتی است (۳۸). برخلاف سلولهای پستانداران، که الیگوساکاریدهای اتصال O عمدتاً متشکل از سیالیک اسید، گالاکتوز و N استیل گالاکتوز آمین هستند، در *P. pastoris* الیگوساکاریدهای اتصال O تنها از باقیمانده مانوز ساخته

انجام شده حاکی از آن است که سویه های حاوی نسخه های متعدد از کاست بیان، اثر مثبتی بر ترشح پروتئین نوترکیب دارند (۷۶،۷۷،۱۳۰) که در جدول ۵ به بعضی از آنها اشاره شده است.

جدول ۵: ژنهای الحاق شده در کاست بیان مخمر *P. pastoris* و میزان اثر آن در نرخ پروتئین ترشحاتی.

gene name	No. copies of the expression cassette	Explanation	Reference
miniproinsulin (MPI)	11	Increase MPI production from 19 to 250 mg/L of secreted protein	[۷۶]
human serum albumin and the ribosomal DNA locus	1	For low gene copy numbers	[۷۷]
porcine insulin precursor (PIP)	12	The highest PIP yield in culture supernatants	[۱۳۰]

به طور کلی، سویه هایی که محتوی کپی های اینترگره شده فراوان از یک کاست بیانی می باشند اغلب نسخه های متعددی از پروتئین خارجی را نسبت به سویه های تک نسخه ای تولید می کنند (جدول ۵). بنابراین بعد از اینکه یک نسخه کپی از ژن مورد نظر در سویه *P. pastoris* جهت تولید مقدار قابل توجهی پروتئین فعال از نظر بیولوژیکی با اندازه صحیح وارد شد، بهتر است جهت افزایش تعداد نسخه های ژن مورد نظر به بررسی و ساخت سویه های کارآمد پردازیم. روشهای مختلفی برای تولید سویه های بیانی با کپی فراوان در مخمر *P. pastoris* وجود دارد که در زیر به سه روش اصلی اشاره می کنیم. در روش اول، یک وکتور با کپی های فراوان دم-سر از یک کاست بیانی ساخته می شود (۲۸). روش دوم مستلزم استفاده از یک وکتور بیانی در مخمر *P. pastoris* است که محتوی هر دو ژن HIS4 و ژن مقاومت به کانامایسین باکتریایی KanR می باشد، که علاوه بر این، مقاومت به آنتی بیوتیک یوکاریوت G418 را سبب می شود (۷۷،۱۰۶). روش سوم استفاده از یک وکتور حمل کننده ژن sh ble باکتریایی است که مقاومت به آنتی بیوتیک زئوسین را به دنبال دارد (۱۰۶). زئوسین از طریق ورود به داخل DNA باعث مرگ سلولی می شود. مقاومت به زئوسین توسط محصول ژن sh ble ایجاد می شود که با اتصال به آنتی بیوتیک آن را غیر فعال می کند (۱۰۶). در نهایت سویه های بیانی با نسخه های فراوان این سه نوع روش گزینش می شوند و جهت تولید پایدار



شده و اضافه می شوند (۴۴). جایی که اکثر یوکاریوت ها، الیگوساکاریدهای اتصال O را بروی گروههای هیدروکسیل از ترئونین و سرین اضافه می کنند، *P. pastoris* نمی تواند دارای اسید آمینه ترجیح داده شده برای گلیکوزیلاسیون باشد. پروتئین های گلیکوزیله با پتانسیل بالایی در مخمر *P. pastoris* تولید می شوند (۱۹،۱۱۴)، اما تولید گلیکوپروتئینهای درمانی در این سیستم به دلیل تفاوت در بیوسنتز کربوهیدرات متصل به پروتئین نسبت به ارگانسیم هدف یعنی انسان مختل شده است (۴۳). با این وجود، پیشرفت های بزرگی در مهندسی سویه *P. pastoris* با گلیکوزیلاسیون N انسانی کامل با استفاده از اصلاحات در دسترس از مسیرهای گلیکوزیلاسیون مخمر ساکارومیسس سرویزیه صورت گرفته است که سبب تبدیل گلیکانهای مانوز نوع مخمری به گلیکانهای مانوز نوع انسانی شوند (۸،۱۴،۴۳). Callewaert و همکاران (۲۰۰۱) (۱۴) یک ۱-۲-آلفا-D-مانوزیداز از *Trichoderma reesei* که مورد هدف شبکه آندوپلاسمی بود با ۲ گلیکوپروتئین شامل همگلوپروتئین از ویروس آنفولانزا و ترانس سیالیداز از تریپانوزوم کروز می هم بیان کردند. نتایج حاصل از آنالیز N- گلیکانهای موجود در هر دو پروتئین خالص شده نشان داد که یک کاهش بالای ۸۵٪ در تعداد باقیمانده اتصال آلفا ۱ و ۲ مانوز وجود دارد و الیگوساکارید مانوز نوع انسانی (2)-GlcNAc(5)-Man، اکثریت N- گلیکان مربوط به ترانس سیالیداز مهندسی شده گلیکو را تشکیل می دهد. در روش دیگر از کتابخانه ژنومی برای انسانی کردن گلیکوزیلاسیون با اتصال N به صورت ترکیبی استفاده شد (۱۹). مسیر ترشحی *P. pastoris* برای انجام واکنش گلیکوزیلاسیون متوالی به صورت ژنتیکی مهندسی شد که بیانگر پردازش اولیه N- گلیکانها در انسان و دیگر پستانداران عالی تر می باشد. بعد از حذف گلیکوزیلاسیون غیر انسانی توسط حذف ژن آلفا- ۱ و ۲ مانوزیل ترانسفراز از *P. pastoris*، چندین کتابخانه ژنتیک ترکیبی ساخته شد که برای فعال شدن در محل آلفا- ۱ و ۲ مانوزیداز و بتا ۱ و ۲ N - استیل گلوکز آمینیل ترانسفراز I انسانی (GnT1) در مسیر ترشحی به کار برده شد. بیان نوترکیب یک پروتئین گزارشگر انسانی در این سویه مهندسی شده منجر به تشکیل یک گلیکوپروتئین با GlcNAc-Man (5)-GlcNAc(2) به عنوان N- گلیکان

اولیه می شود. این استراتژی برای مهندسی مخمر جهت انجام گلیکوزیلاسیون پیچیده شبیه انسان (۷۱) یک مهم به شمار می رود. Verwecken و همکاران (۲۰۰۴) (۱۱۴) با غیر فعال کردن ژن OCHI که مسئول هایپرمانوزیله شدن مخمر برای  $\alpha$ -1-6 مانوزیل ترانسفراز و انسانی کردن گلیکوزیلاسیون N، عمل مهندسی *P. pastoris* را در این ارگانسیم مورد تایید قرار داد. در مرحله دوم آنها یک آنزیم  $\alpha$ - ۱ و ۲ مانوزیداز موجود در شبکه آندوپلاسمی و دو گلیکوزیل ترانسفراز کایمیریک، Kre-2-GnT1 و گالاکتوزیل ترانسفراز 4-1,4-Kre2-B را به میزان زیاد بیان کردند (۱۱۴). گروه دیگر توسط Gerngross (۲۰۰۴) موفق در مهندسی سویه های *P. pastoris* برای انسانی کردن گلیکوپروتئین ها شد (۳۹). سویه ها قادر به ترشح کمپلکس سیالیک انتهایی بودند و آنها را یک جایگزینی مناسب برای تولید گلیکوپروتئین ها در لاین سلولی پستانداران می سازد. به عنوان مثال، این گروه یک اریتروپوتئین نوترکیب با عملکرد کامل در مطالعات حیوانی تولید و مورد ارزیابی قرار دادند به طوریکه با شکل فعال بیولوژیکی آن پروتئین قابل قیاس بود. Li و همکاران در سال ۲۰۰۷ (۷۱) قادر به بهینه کردن تولید IgG انسانی در *P. Pastoris* مهندسی شده قندی بودند که عملکرد موثری را با واسطه آنتی بادی نشان می دهد. در دسترس بودن سویه های *P. pastoris* مهندسی شده، این را یک سیستم بیانی جذاب برای تولید و ترشح پروتئین های نوترکیب می سازد. گلیکوپروتئین های نوترکیب با الگوی گلیکوزیلاسیون صحیح نه تنها مشکلات قابلیت های بالقوه مخمر *P. pastoris* را از بین می برند بلکه اجازه تولید گلیکوپروتئین های درمانی را در این میزبان می دهند.

### بهینه سازی فرآیند تخمیر:

تخمیر برای پروتئین های ترشحی بدلیل مرتبط بودن بازده با تراکم سلولی امری ضروری است به طوریکه در برخی موارد، بیان در فرماتور با افزایش چشمگیری ۱۰ برابری بازده نسبت به فلاسک دیده می شود. پارامترهای عملیات فرآیندهای زیستی، از جمله ترکیبات محیط کشت، دما، PH، میزان استرس و هوادهی و استراتژی های تغذیه می تواند بر عملکرد و کیفیت محصول تاثیر به سزایی بگذارد (۱۵). برای تولید پروتئین های نوترکیب در فرآیندهای تخمیر با تراکم سلولی بالا، به طور

گسترده از یک محیط کشت متشکل از نمک های اساسی، محلول نمک ردیاب (PTM1)، هیدروکسید آمونیوم به عنوان منبع نیتروژن ( که در آن گروه هیدروکسیل جهت حفظ PH)، و ترکیبات تغذیه ای گلیسرول/متانول که به عنوان منبع کربن و انرژی می باشد استفاده می شود. متانول جهت القا پروموتور AOX1 در سویه های MUT+ و Muts استفاده می شود، با این وجود میزان غلظت متانول در کارایی سیستم بیان تاثیر به سزایی دارد چراکه در غلظت بالاتر از ۴ گرم بر لیتر رشد سلول مهار می شود (۴۳). استراتژی های مختلفی جهت تنظیم موثر غلظت متانول در طی فرایند تغذیه وجود دارد که شامل مراحل مختلف است (۱۲۸،۹۹،۱۰۴). در مرحله اول، نژاد مهندسی شده در محیط حاوی گلیسرول، کشت می شود که منبع کربن را مهار می کند تا سلول ها تجمع یابند. در مرحله دوم، یک گلیسرول تغذیه ای در یک سطح محدود کننده در مرحله گذار به کار برده می شود تا غلظت سلول را بدون مهار رشد افزایش دهد. یکی دیگر از اهداف مرحله دوم این است که سلولها برای یکی دیگر از منابع کربنی آماده شوند. در مرحله سوم، متانول به محیط تخمیر جهت شروع فاز القایی اضافه می شود. استفاده از گلیسرول یکی از شایع ترین استراتژی های مورد استفاده در فرایند تغذیه مخمر است (۶۲،۸۳،۱۲۹). با این حال، گزارشی مبنی بر اثر مهار کنندگی گلیسرول اضافی با سرکوب پروموتور AOX1 جهت تولید پروتئین نوترکیب ارائه شده است (۱۲۳). بسیاری از مطالعات انجام شده، استفاده از سوربیتول را به عنوان یک جایگزین با گلیسرول در استراتژی تغذیه ای گلیسرول/متانول پیشنهاد می کنند (۱۳،۱۶،۱۱۶). آزمایشات حاکی از آن است که ترکیب محیط روی رشد و زنده بودن سلول و بیان پروتئین هترولوگ در مخمر تاثیر بسزایی میگذارد، علاوه بر این، عصاره مخمر، کاز آمینو اسید یا EDTA سبب تشدید تجمع پروتئین توسط مخمر پاستوریس می شود. تکمیل محیط القا با ۴ M آلانین، ۵ mm EDTA ترکیب یا ۲٪ کاز آمینواسید در محیط القای BMMY، تولید scFv را تقریباً ۵-۳ برابر افزایش می دهد و به 25mg/l از scFv عملکردی برسد (۷۱). از آنجایی که اکسیژن در اکسیداسیون متانول به فرمالدئید به عنوان یک واکنش جانبی استفاده می شود، نرخ انتقال اکسیژن در مسیر استفاده از متانول از اهمیت ویژه ای برخوردار است که منجر

به شکل گیری محصول می شود (۹۸). به منظور تنظیم مقدار مورد نیاز از اکسیژن، تمامی موانع مربوط به انتقال اکسیژن به حداقل می رسد و هوای غنی شده از اکسیژن استفاده می شود. در بسیاری از فرآیندهای تخمیر *P. pastoris*، در حدود ۲۰-۳۰٪ اکسیژن محلول حفظ می شود (۱۰۹،۱۰۷،۵۲،۱۶،۱۲۳). بسیاری از فرآیندها در مخمر *P. pastoris* در دمای ۳۰ درجه سانتی گراد انجام می شود که مطلوب برای رشد مخمر است. با کاهش دمای رشد از ۳۰ به ۲۰ درجه سانتی گراد، یک افزایش ۳ برابری در بهره وری خاص R-پروتئین در کشت های chemostat از *P. pastoris* صورت گرفت که با کاهش شار از طریق چرخه TCA، کاهش سطح پروتئین های دخیل در پاسخ استرس اکسیداتیو و سطوح پایین تر سلولی از چاپرون های مولکولی بدست آمد (۳۳). PH محیط کشت نقش مهمی را در فرآیندهای تخمیر به عهده دارد زیرا سرعت رشد سلول، فعالیت آنزیم، و تخریب پروتئولیتیک، وابسته به pH محیط کشت می باشد. گزارشات نشان می دهد که مقدار pH در محدوده ۳،۵ تا ۵،۵ می تواند اثر کمی بر روی نرخ رشد سویه Mut+ از *P. pastoris* داشته باشد (۵۵). برای تولید حداکثری پروتئین های مختلف، pH های بهینه مختلفی وجود دارد (۷۵). به عنوان مثال برای تولید اریتروپویتین در *P. pastoris*، بالاترین حالت تولید محصول در دو مرحله تنظیم PH، شامل مرحله تغذیه گلیسرول با pH = ۵،۰ و فاز القایی متانول در pH = ۴،۵ وجود دارد (۱۰۱) و برای تولید هورمون رشد انسانی نوترکیب در *P. pastoris*، بالاترین وضعیت تولید محصول در pH = ۵،۰ می باشد (۱۲).

#### نتیجه گیری و چشم انداز آینده:

سیستم های بیانی مختلفی از مخمرها جهت تولید پروتئین های نوترکیب در حال استفاده می باشد. امروزه به دلیل در دسترس بودن سویه های مخمری، تنوع وکتورهای موجود، پروموتورها، مارکرهای اگزوتروفیک، پروتوکول های ترانسفورماسیونی در یک واکنش ترکیبی با تکنیک های تخمیری، وجود سیستم های بیولوژیکی و بیولوژیک سنتتیک، تکنولوژی ماکرواری و سرعت گسترش پایگاههای اطلاعاتی، استفاده از مخمرها را به طور چشم گیری در حوضه صنعت و تولید افزایش داده است. مطالعات نشان می دهد که مخمر *P. pastoris* دارای پتانسیل

بالایی برای تولید پروتئین های نو ترکیب با هزینه کمتر و کارایی بیشتر می باشد که مطالعات تجاری کردن در بیوراکتورهای صنعتی جهت تولید کنترل شده رو به گسترش است. مدل های ریاضی جامعی از متابولیسم مخمر جهت شناسایی، شبیه سازی و یا مهندسی متابولیک مسیرهای تولیدی در سلول های مخمری پیشنهاد شده است (۸۵). نوع مدل برای استفاده بستگی به هدف از مطالعه و همچنین داده های موجود دارد این در حالی است که مدل ژنومی برای *P. pastoris* (۱۰۰) و *S. cerevisiae* (۴۸) در دسترس است. زیست شناسی مولکولی، نیروی محرکه مهمی در جهت تحقیق در مواد دارویی زیستی و تولید سطح بالایی از پروتئین می باشد. صنعت biopharmaceutical به صورت چند وجهی است به طوریکه ریبوزوم ها، مولکول آنتیسنس، آنتی بادیهای مونوکلونال، ژنومیکس، پروتئومیکس، متابولومیکس، شیمی ترکیبی و بیوسنتز، غربالگری با توان بالا، بیوانفورماتیک، نانوبیوتکنولوژی، ژن درمانی، مهندسی بافت و بسیاری از مسائل دیگر در این ترکیب مهم بیولوژیکی دخیل هستند که اثرات مهم آن در جهان توسط مهندسی ژنتیک نشان داده شده و چهره فارماکولوژی، پزشکی و صنعت را تغییر داده است. در چندین سال آینده باید پیشرفت های مهمی در حل بیماری های حاد مزمن و تولید پیچیده داروهای جدید و واکسن ها، کاهش قابل ملاحظه اثرات آلودگی محیط زیست با استفاده از میکروب های نو ترکیب، و توسعه فرایندهای زیستی نو ترکیب برای حل مشکل انرژی که جهان اکنون با آن مواجه است صورت گیرد.

- (1) Agheli Mansour A, Mousavi SL, Rasooli I, Nazarian S, Amani J, Farhadi N. Cloning, high level expression and immunogenicity of 1163-1256 residues of C-terminal heavy chain of C. botulinum neurotoxin type E. *Biologicals*, 2010; 38(2):260-4.
- (2) Amani J, Mousavi SL, Rafati S, Salmanian AH. In silico analysis of chimeric espA, eae and tir fragments of Escherichia coli O157:H7 for oral immunogenic applications. *Theor Biol Med Model*, 2009;6(28):1-11.
- (3) Amani J, Salmanian AH, Rafati S, Mousavi SL. Immunogenic properties of chimeric protein from espA,eae and tir genes of E.coli O157:H7. *Vaccine*, 2010; 28(42):6923-29.
- (4) Apte-Deshpande A, Somani S, Mandal G, Soorapaneni S, Padmanabhan S. Over expression and analysis of O-glycosylated recombinant human granulocyte colony stimulating factor in Pichia pastoris using Agilent 2100 Bioanalyzer. *J biotechnol*, 2009; 143(1):44-50.
- (5) Banting FG, Best CH, Collip JB, Macleod JJR. The preparation of pancreatic extracts containing insulin. *Trans R Soc Chem*, 1922;16: 27-29.
- (6) Barr KA, Hopkins SA, Sreekrishna K. Protocol for Efficient Secretion of HSA Developed from Pichia pastoris. *Pharm Eng*, 1992; 12:48-51.
- (7) Berndt U, Oellerer S, Zhang Y, Johnson AE, Rospert S. A signal-anchor sequence stimulates signal recognition particle binding to ribosomes from inside the exit tunnel. *Proc Natl Acad Sci U S A*, 2009; 106:1398-403.
- (8) Bobrowicz P, Davidson RC, Li H, Potgieter TI, Nett JH, Hamilton SR, et al. Engineering of an artificial glycosylation pathway blocked in core oligosaccharide assembly in the yeast Pichia pastoris: production of complex humanized glycoproteins with terminal galactose. *Glycobiology*, 2004; 14:757-66.
- (9) Brockmeier U, Caspers M, Freudl R, Jockwer A, Noll T, Eggert T. Systematic Screening of All Signal Peptides from Bacillus subtilis: A Powerful Strategy in Optimizing Heterologous Protein Secretion in Gram-positive Bacteria. *J Mole Biol*, 2006; 362:393-402.
- (10) Brodsky JL. Translocation of proteins across the endoplasmic reticulum membrane. *Int Rev Cytol*, 1998; 178:277-328.
- (11) Buckholz RG, Gleeson MAG. Yeast Systems for the Commercial Production of Heterologous Protein. *Biotechnology*, 1991; 9:1067-72.
- (12) Çalık P, Bayraktar E, İnankur B, Soyaslan EŞ, Şahin M, Taşpınar H, et al. Influence of pH on recombinant human growth hormone production by Pichia pastoris. *J Chem Technol Biot*, 2010; 85:1628-35.
- (13) Çalık P, İnankur B, Soyaslan EŞ, Şahin M, Taşpınar H, Açık E, et al. Fermentation and oxygen transfer characteristics in recombinant human growth hormone production by Pichia pastoris in sorbitol batch and methanol fed-batch operation. *J Chem Technol Biot*, 2010; 85:226-33.
- (14) Callewaert N, Laroy W, Cadirgi H, Geysens S, Saelens X, Min Jou W, et al. Use of HDELtagged Trichoderma reesei mannosyl oligosaccharide 1, 2-alpha-D-mannosidase for Nglycan engineering in Pichia pastoris. *FEBS Lett*, 2001; 503:173-8.
- (15) Çelik E, Çalık P. Production of recombinant proteins by yeast cells. *Biotechnol Adv* 2011; doi:10.1016/j.biotechadv.2011.09.011.
- (16) Çelik E, Çalık P, Oliver SG. Fed-batch methanol feeding strategy for recombinant protein production by Pichia pastoris. *Yeast*, 2009; 26:474-84.
- (17) Cereghino JL, Cregg JM. Heterologous protein expression in the methylotrophic yeast Pichia pastoris. *FEMS Microbiol Rev*, 2000; 24:45-66.
- (18) Chen H, Ren A, Hu S, Mo W, Xin X, Jia W. The significance of tumor necrosis factor-alpha in newly diagnosed type 2 diabetic patients by transient intensive insulin treatment. *Diabetes Res Clin Pract*, 2007; 75:327-32.
- (19) Choi BK, Bobrowicz P, Davidson RC, Hamilton SR, Kung DH, Li H, et al. Use of combinatorial genetic libraries to humanize N-linked glycosylation in the yeast Pichia pastoris. *Proc Natl Acad Sci U S A*, 2003; 100:5022-7.
- (20) Clare JJ, Romanos MA, Rayment FB, Rowedder JE, Smith MA, Payne MM, Sreekrishna K, Henwood CA. Production of Epidermal Growth Factor in Yeast: High-level Secretion Using Pichia pastoris Strains Containing Multiple Gene Copies. *Gene*, 1991; 105:205-12.
- (21) Cos O, Ramon R, Montesinos JL, Valero F. Operational strategies, monitoring and control of heterologous protein production in the methylotrophic yeast Pichia pastoris under different promoter: a review. *Microb Cell Fact*, 2006; 5:17-38.
- (22) Cos O, Resina D, Ferrer P, Montesinos JL, Valero F. Heterologous production of Rhizopus oryzae lipase in Pichia pastoris using the alcohol oxidase and formaldehyde dehydrogenase promoters in batch and fed-batch cultures. *Biochem Eng J*, 2005;26(2):86-94.
- (23) Cregg JM, Madden KR, Barringer KJ, Thill G, Stillman CA. Functional Characterization of the Two Alcohol Oxidase Genes from the Yeast, Pichia pastoris. *Mol Cell Biol*, 1989; 9:1316-1323.
- (24) Cregg JM, Tolstorukov I, Kusari A, Sunga J, Madden K, Chappell T. Expression in the yeast Pichia pastoris. Guide to protein purification. Second Edition, 2009; 463:169-89.
- (25) Cregg JM, Vedvick TS, Raschke WC. Recent advances in the expression of foreign genes in Pichia pastoris. *Biotechnology*, 1993; 11:905-10.
- (26) Dale C, Allen A, Fogarty S. Pichia pastoris: a eukaryotic system for the large-scale production of biopharmaceuticals. *Biopharm*, 1999; 12(11):36-42.
- (27) Daly R, Hearn MT. Expression of heterologous proteins in Pichia pastoris: a useful experimental tool in protein engineering and production. *J Mol Recognit*, 2005; 18:119-38.
- (28) Damasceno LM, Huang CJ, Batt CA. Protein secretion in Pichia pastoris and advances in protein production. *Appl Microbiol Biotechnol*, 2012; 93:31-9.
- (29) Demain AL. The biopharmaceutical revolution. *Chem Today (Chim Oggi)*, 2004; 22:11-2.



- (30) Demain AL, Vaishnav P. Production of recombinant proteins by microbes and higher organisms. *Biotechnol Adv*, 2009; 27:297–306.
- (31) Dixon B. Enzyme expression. Glycosylation enhances stability. *Biotechnology*, 1991; 9:418.
- (32) Dong M, Shuang Y, Fen H, Jie Z, Yuhuan Q, Jun D, Tianhui Z. Expression and Secretion of Human Bone Morphogenetic Protein-6 in *Pichia pastoris* [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Nankaiensis*, 2010; 1:008.
- (33) Dragosits M, Stadlmann J, Albiol J, Baumann K, Maurer M, Gasser B, et al. The effect of temperature on the proteome of recombinant *Pichia pastoris*. *J Proteome Res*, 2009; 8:1380–92.
- (34) Ellis SB, Brust PF, Koutz PJ, Waters AF, Harpold MM, Gingeras TR. Isolation of alcohol oxidase and two other methanol regulatable genes from the yeast *Pichia pastoris*. *Mol Cell Biol*, 1985; 5:1111–21.
- (35) Fogel S, Welch JW. Tandem gene amplification mediates copper resistance in yeast. *Proc Natl Acad Sci U S A*, 1982; 79:5342–6.
- (36) Gellissen G. Heterologous protein production in methylotrophic yeasts. *Appl Microbiol Biotechnol*, 2000; 54:741–50.
- (37) Gellissen G, Janowicz ZA, Weydemann U, Melber K, Strasser AWM, Hollenberg CP. High-level expression of foreign genes in *Hansenula polymorpha*. *Biotech Adv*, 1992; 10:179–89.
- (38) Gemmill TR, Trimble RB. Overview of N- and O-linked oligosaccharide structures found in various yeast species. *BBA-Gen Subjects*, 1999; 1426:227–37.
- (39) Gerngross TU. Advances in the production of human therapeutic proteins in yeasts and filamentous fungi. *Nat Biotechnol*, 2004; 22:1409–14.
- (40) Gritz L, Davies J. Plasmid-encoded hygromycin-b resistance the sequence of hygromycinb phosphotransferase gene and its expression in *Escherichia coli* and *Saccharomyces cerevisiae*. *Gene*, 1983; 25:179–88.
- (41) Grobber NG, Eggink G, Cuperus FP, Huizing HJ. Production of acetone, butanol and ethanol (ABE) from potato wastes: fermentation with integrated membrane extraction. *Appl Microbiol Biotechnol*, 1993; 39(4-5):494-498.
- (42) Ha SH, Park JJ, Kim JW, Jeong JW, Noh KS, Jeon YJ, Kin HS, Kim HB. Molecular cloning and high-level expression of G2 protein of hantaan (HTN) virus 76–118 strain in the yeast *Pichia pastoris* KM71. *Virus Genes*, 2001; 22:167–73.
- (43) Hamilton SR, Bobrowicz P, Bobrowicz B, Davidson RC, Li H, Mitchell T, et al. Production of complex human glycoproteins in yeast. *Science*, 2003; 301:1244–6.
- (44) Hamilton SR, Davidson RC, Sethuraman N, Nett JH, JiangYW, Rios S, et al. Humanization of yeast to produce complex terminally sialylated glycoproteins. *Science*, 2006; 313:1441–3.
- (45) Hang YD, Luh BS, Woodams EE. Microbial production of citric acid by solid state fermentation of kiwi fruit peel. *J Food Sci*, 1987; 52(1):226-227.
- (46) Hartwig DD, Oliveira T, Seixas KF, Forster MK, Rizzi C, Hartleben PC, McBride JAA, Odir DA. High yield expression of leptospirosis vaccine candidates LigA and LipL32 in the methylotrophic yeast *Pichia pastoris*. *Microbial Cell Factories*, 2010; 9:98. doi: 10.1186/1475-2859-9-98.
- (47) Helenius A, Aebi M. Intracellular functions of N-linked glycans. *Science*, 2001; 291:2364–9.
- (48) Herrgard MJ, Swainston N, Dobson P, et al. A consensus yeast metabolic network reconstruction obtained from a community approach to systems biology. *Nat Biotechnol*, 2008; 26:1155–60.
- (49) Heydari A, Moosazadeh Moghaddam M, Aghamollaei H, Yakhchali M, Bambaee B, Latifi A, Heiat M. Cloning and Expression of the *Bacillus Pumilus* F3 Lipase Gene into *Bacillus Subtilis* and Determining of Comparative Expression Level Between Native and Recombinant Enzyme. *New Cell Mol Biotechnol*, 2013; 3: 67-73.
- (50) Higgins DR, Cregg JM. (Eds.). (1998). *Pichia protocols* (Vol. 103). Springer.
- (51) Hohenblum H, Gasser B, Maurer M, Borth N, Mattanovich D. Effects of gene dosage, promoters, and substrates on unfolded protein stress of recombinant *Pichia pastoris*. *Biotechnol Bioeng*, 2004; 85:367–75.
- (52) Horstkotte B, Arnau C, Francisco V, Elsholz O, Cerda V. Monitoring of sorbitol in *Pichia pastoris* cultivation applying sequential injection analysis. *Biochem Eng J*, 2008; 42:77–83.
- (53) Huang CJ, Damasceno LM, Anderson KA, Zhang S, Old LJ, Batt CA. A proteomic analysis of the *Pichia pastoris* secretome in methanol-induced cultures. *Appl Microbiol Biotechnol*, 2011; 90:235–47.
- (54) Idiris A, Tohda H, Kumagai H, Takegawa K. Engineering of protein secretion in yeast: strategies and impact on protein production. *Appl Microbiol Biotechnol*, 2010; 86:403–17.
- (55) Inan M, Chiruvolu V, Eskridge KM, Vlasuk GP, Dickerson K, Brown S, et al. Optimization of temperature–glycerol–pH conditions for a fed-batch fermentation process for recombinant hookworm (*Ancylostoma caninum*) anticoagulant peptide (AcAP-5) production by *Pichia pastoris*. *Enzyme Microb Technol*, 1999; 24:438–45.
- (56) Invitrogen. Multi-copy *Pichia* Expression Kit, Version E. 1999, Carlsbad, CA.
- (57) Jahic M, Rotticci-Mulder J, Martinelle M, Hult K, Enfors SO. Modeling of growth and energy metabolism of *Pichia pastoris* producing a fusion protein. *Bioprocess Biosyst Eng*, 2002; 24(6):385-393.
- (58) Jimenez A, Davies J. Expression of a transposable antibiotic-resistance element in *Saccharomyces*. *Nature*, 1980; 287:869–71.
- (59) Johnston M. A Model Fungal Gene Regulatory Mechanism: the GAL Genes of *Saccharomyces Cerevisiae*. *Microbiol Rev*, 1987; 51:458-76.
- (60) Johnson MA, Waterham HR, Ksheminska GP, Fayura LR, Cereghino JL, Stasyk OV, et al. Positive selection of novel peroxisome biogenesis-defective mutants of the yeast *Pichia pastoris*. *Genetics*, 1999; 151:1379–91.
- (61) Jones EW, Fink GR. Regulation of amino acid and nucleotide biosynthesis in yeast, in *The Molecular Biology of the Yeast Saccharomyces: Metabolism and Gene Expression*. (Cold Spring Harbor Laboratory Press, New York, Cold Spring Harbor) 1982; 181-289.
- (62) Jungo C, Marison IW, von Stockar U. Mixed feeds of glycerol and methanol can improve the performance of *Pichia pastoris* cultures: a quantitative study based in concentration gradients in transient continuous cultures. *J Biotechnol*, 2007; 128:824–37.
- (63) Khalesi R, Nazarian S, Ehsaei Z, Mansouri M, Amani J, Moazzeni M, Salimian J. Cloning and Expression of Enterotoxigenic *Escherichia Coli* Heat Labile Toxin B Subunit (LTB) as Vaccine Candidate. *Kosar Medical Journal (KMJ)*, 2009; 14(2):95-100.



- (64) Kida Y, Morimoto F, Sakaguchi M. Signal anchor sequence provides motive force for polypeptide chain translocation through the endoplasmic reticulum membrane. *J Biol Chem*, 2009; 284:2861-6.
- (65) Kjærulff S, Jensen MR. Comparison of different signal peptides for secretion of heterologous proteins in fission yeast. *Biochem Biophys Res Commun*, 2005; 336:974-82.
- (66) Kobayashi K, Kuwae S, Ohya T, Ohda T, Ohyama M, Ohi H, Tomomitsu K, Ohmura T. High-level expression of recombinant human serum albumin from the methylotrophic yeast *Pichia pastoris* with minimal protease production and activation. *J Biosci Bioeng*, 2000; 89:55-61.
- (67) Kottmeier K, Mueller C, Huber R, Buechs J. Increased product formation induced by a directed secondary substrate limitation in a batch *Hansenula polymorpha* culture. *Appl Microbiol Biotechnol*, 2010; 86:93-101.
- (68) Koutz PJ, Davis GR, Stillman C, Barringer K, Cregg JM, Thill G. Structural Comparison of the *Pichia pastoris* Alcohol Oxidase Genes. *Yeast*, 1989; 5:167-77.
- (69) Larkin A, Imperiali B. The expanding horizons of asparagine-linked glycosylation. *Biochemistry*, 2011; 50:4411-26.
- (70) Li B, Cao Y, Zhou L, Liang C, Sun F. A novel protein expression system-Pichia Pink™- and a protocol for fast and efficient recombinant protein expression. *Afr J Biotechnol*, 2011; 83:19464-72.
- (71) Li P, Anumanthan A, Gao XG, Ilangovan K, Suzara VV, Düzgüne N, Renugopalakrishnan V. Expression of Recombinant Proteins in *Pichia Pastoris*. *Appl Biochem Biotechnol*, 2007; 142:105-124.
- (72) Li ZJ, Zhao Q, Liang H, Jiang S, Chen T, Grella D, et al. Control of recombinant human endostatin production in fed-batch cultures of *Pichia pastoris* using the methanol feeding rate. *Biotechnol Lett*, 2002; 24(19):1631-5.
- (73) Lin-Cereghino J, Wong WW, Giang W, Luong LT, Vu J, Johnson SD, Lin-Cereghino GP. Condensed protocol for competent cell preparation and transformation of the methylotrophic yeast *Pichia pastoris*. *Biotechniques*, 2005;38(1):44.
- (74) Liu ZM, Zhao HL, Xue C, Deng BB, Zhang W, Xiong XH, Yao XQ. Secretory expression and characterization of a recombinant-deleted variant of human hepatocyte growth factor in *Pichia pastoris*. *World J Gastroenterol*, 2005; 11(45):7097.
- (75) Macaulay-Patrick S, Fazenda ML, McNeil B, Harvey LM. Heterologous protein production using the *Pichia pastoris* expression system. *Yeast*, 2005; 22:249-70.
- (76) Mansur M, Cabello C, Hernandez L, Pais J, Varas L, Valdes J, Terrero Y, Hidalgo A, Plana L, Besada V, Garcia L, Lamazares E, Castellanos L, Martinez E. Multiple gene copy number enhances insulin precursor secretion in the yeast *Pichia pastoris*. *Biotechnol Lett*, 2005; 27:339-45.
- (77) Marx H, Mecklenbrauker A, Gasser B, Sauer M, Mattanovich D. Directed gene copy number amplification in *Pichia pastoris* by vector integration into the ribosomal DNA locus. *FEMS Yeast Res*, 2009; 9:1260-70.
- (78) Morrow KJ Jr. Improving protein production processes. *Gen Eng News*, 2007; 27(5):50-41.
- (79) Mousavi ML, Amani J, Tavalai M, Kamali M. Cloning, expression and purification of the gene coding translocating domain of Botulinum Neurotoxin type A. *Modares Journal of Medical Sciences (MJMS)*, 2004; 7(2):81-92.
- (80) Nevalainen KMH, Te'o VJS, Bergquist PL. Heterologous protein expression in filamentous fungi. *Trends Biotech*, 2005; 23:468-74.
- (81) Ng DT, Brown JD, Walter P. Signal sequences specify the targeting route to the endoplasmic reticulum membrane. *J Cell Biol*, 1996; 134:269-78.
- (82) Nunberg JH, Meade JH, Cole G, Lawyer FC, MacCabe P, Schweickart V, et al. Molecular cloning and characterization of the glucoamylase gene of *Aspergillus niger*. *Molec Cell Biol*, 1984; 2:2306-15.
- (83) Orman MA, Çalik P, Özdamar TH. The influence of carbon sources on recombinant human growth-hormone production by *Pichia pastoris* is dependent on phenotype: a comparison of MutS and Mut+. *Biotechnol Appl Bioc*, 2009; 52:245-55.
- (84) Parekh R. Polypeptide glycosylation and biotechnology. *Biotech Eur*, 1989; 6(1):18-21.
- (85) Papini M, Salazar M, Nielsen J. Systems biology of industrial microorganisms. In: Wittmann C, Krull WR, editors. *Biosystems engineering I: creating superior biocatalysts*, 120. *Adv Biochem Eng Biotechnol*, 2010; 51-99.
- (86) Patil C, Walter P. Intracellular signaling from the endoplasmic reticulum to the nucleus: the unfolded protein response in yeast and mammals. *Curr Opin Cell Biol*, 2001; 13:349-55.
- (87) Pavlou AK, Reichert JM. Recombinant protein therapeutics: success rates, market trends and values to 2010. *Nat Biotechnol*, 2004; 22:1513-9.
- (88) Pfeifer TA, Hegedus DD, Grigliatti TA, Theilmann DA. Baculovirus immediate-early promoter mediated expression of the Zeocin(TM) resistance gene for use as a dominant selectable marker in Dipteran and Lepidopteran insect cell lines. *Gene*, 1997; 188:183-90.
- (89) Plantz BA, Sinha J, Villarete L, Nickerson KW, Schlegel VL. *Pichia pastoris* fermentation optimization: Energy state and testing a growth-associated model. *Appl Microbiol Biotechnol*, 2006; 72:297-305.
- (90) Raemaekers RJ, de Muro L, Gatehouse JA, Fordham-Skelton AP. Functional phytohemagglutinin (PHA) and *Galanthus nivalis* agglutinin (GNA) expressed in *Pichia pastoris* correct Nterminal processing and secretion of heterologous proteins expressed using the PHA-E signal peptide. *Eur J Biochem*, 1999; 265:394-403.
- (91) Riedl M. Hereditary angioedema therapy: Kallikrein inhibition and bradykinin receptor antagonism. *World Allergy Organ J*, 2010; 3(9):S34-S38.
- (92) Rinderknecht E, O'Connor BH, Rodriguez H. Natural human interferon- $\gamma$ : complete amino acid sequencing and determination of site of glycosylation. *J Biol Chem*, 1984; 259:6790-7.
- (93) Romanos MA, Scorer CA, Clare JJ. Foreign gene expression in yeast: a review. *Yeast*, 1992; 8:423-88.
- (94) Romanos MA, Scorer CA, Sreekrishna K, Clare JJ. The generation of multicopy recombinant strains. *Methods Mol Biol*, 1998; 103:55-72.
- (95) Sears IB, O'Connor J, Rossanese OW, Glick BS. A versatile set of vectors for constitutive and regulated gene expression in *Pichia pastoris*. *Yeast*, 1998; 14:783-90.
- (96) Sevastyanovich Y, Alfasi S, Cole J. Recombinant protein production: a comparative view on host physiology. *New Biotechnol*, 2009; 25(4):175-180.
- (97) Shen S, Sulter G, Jeffries TW, Cregg JM. A strong nitrogen source regulated promoter for controlled expression of foreign genes in the yeast *Pichia pastoris*. *Gene*, 1998; 216:93-102.

- (98) Sibirny AA, Ubiryovk VM, Gonchar MV, Titorenko VI, Voronovsky AY, Kapultsevich YG, et al. Reaction of direct formaldehyde oxidation to CO<sub>2</sub> are not essential for energy supply of yeast methylotropic growth. *Arch Microbiol*, 1990; 154:566–75.
- (99) Sinha J, Plantz BA, Inan M, Meagher MM. Causes of proteolytic degradation of secreted recombinant proteins produced in methylotropic yeast *Pichia pastoris*: case study with recombinant ovine interferon- $\tau$ . *Biotechnol Bioeng*, 2004; 89:102–12
- (100) Sohn SB, Graf AB, Kim TY, et al. Genome-scale metabolic model of methylotropic yeast *Pichia pastoris* and its use for in silico analysis of heterologous protein production. *Biotechnol J*, 2010; 5:707–15.
- (101) Soyaslan EŞ, Çalık P. Enhanced recombinant human erythropoietin production by *Pichia pastoris* in methanol fed-batch/sorbitol batch fermentation through pH optimization. *Biochem Eng J*, 2011; 55:59–65.
- (102) Sreekrishna K, Brankamp RG, Kropp KE, Blankenship DT, Tsay JT, Smith PL, Wierschke JD, Subramaniam A, Birkenberger LA. Strategies for optimal synthesis and secretion of heterologous proteins in the methylotropic yeast *Pichia pastoris*. *Gene*, 1997; 190(1):55-62.
- (103) Sreekrishana K, Nelles L, Potenz R, Cruze J, Mazzaferro P, et al. High level expression, purification, and characterization of recombinant human tumor necrosis factor synthesized in the methylotropic yeast *Pichia pastoris*. *Biochemistry*, 1989; 28:4117–25.
- (104) Stratton J, Chiruvolu V, Meagher M. High cell density fermentation. In: Higgins DR, Cregg JM, editors. *Methods in molecular biology: Pichia protocols*. Totowa NJ: Humana press; 1998.
- (105) Suga M, Hatakeyama T. High efficiency transformation of *Schizosaccharomyces pombe* pretreated with thiol compounds by electroporation. *Yeast*, 2001; 18:1015-21.
- (106) Sunga AJ, Cregg JM. The *Pichia pastoris* formaldehyde dehydrogenase gene (FLD1) as a marker for selection of multicopy expression strains of *Pichia pastoris*. *Gene*, 2004; 330:39–47.
- (107) Surribas A, Resina D, Ferrer P, Valero F. Rivoflavin may interfere with on-line monitoring of secreted green fluorescence protein fusion proteins in *Pichia pastoris*. *Microb Cell Fact*, 2007; 18:6-15.
- (108) Swanton E, Bulleid NJ. Protein folding and translocation across the endoplasmic reticulum membrane. *Mol Membr Biol*, 2003; 20:99–104.
- (109) Thorpe ED, d'Anjou MC, Daugulis AJ. Sorbitol as a non-repressing carbon source for fed batch fermentation of recombinant *Pichia pastoris*. *Biotechnol Lett*, 1999; 21:669–72.
- (110) Tschopp JF, Brust PF, Cregg JM, Stillman CA, Gingeras TR. Expression of the lacZ gene from two methanol-regulated promoters in *Pichia pastoris*. *Nucleic Acids Res*, 1987; 15:3859–76.
- (111) Valipoor E, Mousavi SL, Rasooli I, Nazarian S, Amani J, Farhadi N. Immunogenic potentials of binding domain and its C-terminus part of *Clostridium botulinum* Type E Neurotoxin in comparison with its toxoid. *Iranian J Biotech*, 2011; 9(3):181-7.
- (112) Vassileva A, Chugh DA, Swaminathan S, Khanna N. Effect of copy number on the expression levels of hepatitis B surface antigen in the methylotropic yeast *Pichia pastoris*. *Protein Exp Purif*, 2001; 21:71-80.
- (113) Vassileva A, Chugh DA, Swaminathan S, Khanna N. Expression of hepatitis B surface antigen in the methylotropic yeast *Pichia pastoris* using the GAP promoter. *J Biotechnol*, 2001; 88:21-35
- (114) Verweken W, Kaigorodov V, Callewaert N, Geysens S, De Vusser K, Contreras R. In vivo synthesis of mammalian-like, hybrid-type N-glycans in *Pichia pastoris*. *Appl Environ Microbiol*, 2004; 70:2639–46.
- (115) Wang Y, Liang ZH, Zhang YS, Yao SY, Xu YG, et al. Human insulin from a precursor overexpressed in the methylotropic yeast *Pichia pastoris* and a simple procedure for purifying the expression product. *Biotech Bioeng*, 2001; 73:74–9.
- (116) Wang Z, Wang Y, Zhang D, Li J, Hua Z, Guocheng D, et al. Enhancement of cell viability and alkaline polygalacturonate lyase production by sorbitol co-feeding with methanol in *Pichia pastoris* fermentations. *Biosource Technol*, 2010; 101:1318–23.
- (117) Wang Y, Yuan S, Wang P, Liu X, Zhan D, Zhang Z. Expression, purification, and characterization of recombinant human keratinocyte growth factor-2 in *Pichia pastoris*. *J Biotechnol*, 2007; 132(1):44.
- (118) Waterham HR, Digan ME, Koutz PJ, Lair SV, Cregg JM. Isolation of the *Pichia pastoris* glyceraldehyde-3-phosphate dehydrogenase gene and regulation and use of its promoter. *Gene*, 1997; 186:37–44.
- (119) Werten MWT, van den Bosch TJ, Wind RD, Mooibroek H, De Wolf FA. High-yield secretion of recombinant gelatins by *Pichia pastoris*. *Yeast*, 1999; 15:1087–96.
- (120) Wu D, Ma D, Hao YY, Chu J, Wang YH, Zhuang YP, Zhang SL. Incomplete formation of intramolecular disulfide bond triggers degradation and aggregation of human consensus interferon-alpha mutant by *Pichia pastoris*. *Appl Microbiol Biotechnol*, 2010; 85:1759–67.
- (121) Wu JM, Lin JC, Chieng LL, Lee CK, Hsu TA. Combined use of GAP and AOX1 promoter to enhance the expression of human granulocyte-macrophage colony-stimulating factor in *Pichia pastoris*. *Enzyme Microb Tech*, 2003; 33:453–9.
- (122) Xie J, Zhang L, Ye Q, Zhou Q, Xin L, Du P, Gan R. Angiostatin production in cultivation of recombinant *Pichia pastoris* fed with mixed carbon sources. *Biotechnol Lett*, 2003; 25(2):173-7.
- (123) Xie J, Zhou Q, Du P, Gan R, Ye Q. Use of different carbon sources in cultivation of recombinant *Pichia pastoris* for angiostatin production. *Enzyme Microb Tech*, 2005; 36:210–6.
- (124) Yamaguchi K, Akai K, Kawanishi G, Ueda M, Masuda S. Effects of site-directed removal of N-glycosylation sites in human erythropoietin on its production. *J Biol Chem*, 1991; 266:20434–9.
- (125) Zani ML, Nobar SM, Lacour SA, Lemoine S, Boudier C, Bieth JG, Moreau T. Kinetics of the inhibition of neutrophil proteinases by recombinant elafin and preelafin (trappin2) expressed in *Pichia pastoris*. *Eur J Biochem*, 2004; 271(12):2370-2378.
- (126) Zhang AL, Luo JX, Zhang TY, Pan YW, Tan YH, Fu CY, Tu FZ. Recent advances on the GAP promoter derived expression system of *Pichia pastoris*. *Mol Biol Rep*, 2009; 36(6):1611-1619.
- (127) Zhang AL, Zhang TY, Luo JX, Chen SC, Guan WJ, Fu CY, Peng SQ, Li HL. Constitutive expression of human angiostatin in *Pichia pastoris*. *J Ind Microbiol Biotechnol*, 2007; 34:117–22.
- (128) Zhang W, Bevins MA, Plantz BA, Smith LA. Modeling *Pichia pastoris* growth on methanol and optimizing the

production of a recombinant protein, the heavy-chain fragment C of Botulinum neurotoxin, serotype A. *Biotechnol Bioeng*, 2000; 70:1–8.

(129) Zhang WH, Potter KJ, Plantz BA, Schlegel VL, Smith LA, Meagher MM. *Pichia pastoris* fermentation with mixed-feeds of glycerol and methanol: growth kinetics and production improvement. *J Ind Microbiol Biotechnol*, 2003; 30:210–5.

(130) Zhu T, Guo M, Tang Z, Zhang M, Zhuang Y, Chu J, Zhang S. Efficient generation of multi-copy strains for optimizing secretory expression of porcine insulin precursor in yeast *Pichia pastoris*. *J Appl Microbiol*, 2009; 107:954–63.

(131) Zuraw B, Yasothan U, Kirkpatrick P. Ecallantide. *Nat Rev Drug Discov*, 2010; 9(3):189-190.