

تلومراز و مهار آن در سرطان: مقاله مروری

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۸۸/۰۷/۱۲ تاریخ پذیرش: ۱۳۸۸/۰۸/۰۲

چکیده

تلومراز که در سال ۱۹۳۸ برای اولین بار شناسایی شد، ساختار انتهایی کروموزوم در یوکاریوت‌ها است که وظیفه حیاتی حفاظت از انتهای کروموزوم را بر عهده دارد. در انسان و مهره‌داران تلومراز از هزاران تکرار ۳'-TTAGGG-۵' که به شکل پشت سر هم در انتهای کروموزوم قرار دارند، تشکیل شده است و وظیفه اصلی آن حفاظت و پایداری کروموزوم می‌باشد. تلومراز انتهای کروموزوم را از تجزیه شدن، نوآرایی و الحاق انتهایی حفظ می‌کند. در هر تقسیم سلولی به شکل پیوسته بخشی از درازای تلومراز کوتاه می‌شود. کوتاه شدن پیوسته تلومراز به جدا شدن یک‌سری از پروتئین‌ها از ساختار تلومراز و تغییر بیان ژن منجر می‌شود. وجود تلومراز موجب سرکوب ژن‌های مجاور می‌شود و کوتاه شدن تلومراز موجب کاهش قلمرو اثر آن در سرکوب ژن‌های مجاور می‌گردد و ژن‌هایی که تاکنون خاموش بوده‌اند، روشن می‌شوند. کوتاه شدن مداوم تلومراز به توقف چرخه سلولی و مرگ سلولی می‌انجامد. سه مکانیسم کلی برای افزایش درازای تلومراز در موجودات یوکاریوت وجود دارد و مکانیسم غالب استفاده از آنزیم تلومراز است. تلومراز آنزیمی است که بدون نیاز به الگو موجب سنتز تلومراز می‌شود. در حدود ۹۰٪ از سلول‌های سرطانی دارای سطح بالایی از آنزیم تلومراز هستند. این سلول‌ها به کمک آنزیم تلومراز، کوتاه شدن تلومراز را که در پی تقسیم‌های متوالی روی می‌دهد جبران می‌کنند. در مجموع تلومراز می‌تواند یک‌هدف مناسب در درمان و مهار سرطان به حساب آید و تاکنون روش‌های گوناگونی مانند مهار مستقیم تلومراز و ایمنی‌درمانی تلومراز برای مهار این آنزیم پیشنهاد شده است.

کلمات کلیدی: تلومراز، مهار، سرطان، تشخیص مولکولی.

محمد رضا نوری دلویی*

سروش شهریار حسامی

گروه ژنتیک پزشکی، دانشکده پزشکی، دانشگاه علوم پزشکی تهران

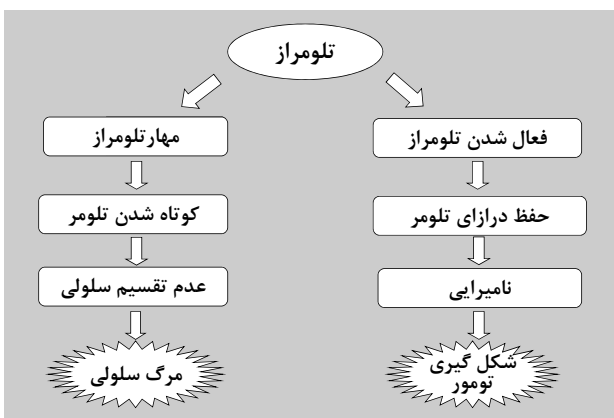
* نویسنده مسئول: تهران، دانشکده پزشکی، دانشگاه علوم پزشکی تهران
تلفن: ۸۸۹۵۳۰۰۵
email: nooridalooi@sina.tums.ac.ir

مقدمه

نقش مهمی را در حفظ یکپارچگی (integrity) کروموزوم دارند و مانع ایجاد پل الحاق-شکست (rupture-fusion-bridge) که موجب ایجاد بحران در حیات سلول می‌شود می‌گردند.^{۱-۴} حدود ۳۰ سال بعد James Watson هنگام مطالعه بر روی همانندسازی (replication) DNA بیان کرد مشکل همانندسازی انتهایی کروموزوم (end replication problem) موجب ناتوانی سلول در همانندسازی کامل کروموزوم خطی می‌شود. او فرض کرد که به دلیل وجود ساختاری ویژه در انتهای کروموزوم، آنزیم DNA پلیمرز قادر به همانندسازی کامل انتهای ۳' کروموزوم نیست، در نتیجه در هر تقسیم سلولی بخشی از تلومراز در واقع از کروموزوم کوتاه می‌شود.^{۵،۶} در سال ۱۹۶۱ Hayflick بیان کرد که در محیط آزمایشگاه (in vitro) سلول‌های طبیعی در حدود ۵۰ بار تقسیم می‌شوند و پس از آن وارد مرحله عدم فعالیت سلولی (senescence) می‌گردند. در همان زمان

در سال ۱۹۳۸ هرمان مولر (Hermann Muller) مگس سرکه (*Drosophila melanogaster*) را با پرتو X مواجه کرد و مشاهده نمود که پایانه‌های کروموزومی از دیگر نقاط کروموزوم متفاوت است و در اثر پرتو X دارای تغییرات ساختاری مانند حذف (deletion) و واژگونی (inversion) نشده است. مولر این بخش را که از اثرات پرتو در امان مانده بود، تلومراز (Telomere) که از ریشه یونانی Telo به معنی انتها و mere به معنی بخش است نام نهاد.^{۱،۵} دو سال پس از این نام‌گذاری Barbara McClintock که بر روی ژنتیک غلات از جمله ذرت (*Zea mays*) کار می‌کرد، با توجه به آزمون‌های خود بیان نمود که شکستگی در کروموزوم‌ها موجب اتصال آنها از نواحی انتهایی و شکل‌گیری کروموزوم‌های دو سانترومری (dicentric) می‌شود. مک‌کلینتاک این‌گونه نتیجه‌گیری کرد که پایانه‌های کروموزوم

در اثر تقسیمات متوالی تلومر کوتاه‌تر شده و سرانجام موجب خروج سلول از چرخه سلولی و ورود به مرحله عدم فعالیت سلولی (senescence) می‌شود، جایی که سلول دیگر تقسیم نمی‌شود و در نهایت می‌میرد.^{۱۵-۱۳} در سال ۱۹۹۰، Shay و Harley با انجام آزمون‌هایی در ۵۰ نمونه از بافت‌های طبیعی سوماتیک مشاهده کردند که همگی فاقد فعالیت آنزیم تلومراز هستند، در حالی که در ۹۰ نمونه از ۱۰۱ نمونه توموری فعالیت این آنزیم قابل تشخیص بود. از آن زمان تا سال ۲۰۰۴ بیش از ۲۶۰۰۰ نمونه توموری مورد آزمایش قرار گرفته و فعالیت آنزیم تلومراز در ۹۰ درصد تومورها مشاهده شده است. این در حالی است که فعالیت آنزیم تلومراز در بافت‌های طبیعی سوماتیک وجود ندارد. این مطالعات نشان می‌داد که آنزیم تلومراز می‌تواند نقش آشکاری در شکل‌گیری تومور (tumorigenesis) داشته باشد. تلومر به مثابه یک ساعت زیستی است و در هر تقسیم سلولی در انسان، به دلیل end replication problem، ۳۰ تا ۱۰۰ جفت باز از درازای آن کاسته می‌شود.^{۱۷، ۱۶ و ۱۴} کاهش درازای تلومر را که در هر تقسیم سلولی رخ می‌دهد، آنزیم تلومراز در صورت فعالیت می‌تواند جبران کند. در سلول‌های سوماتیک به دلیل فعال نبودن این آنزیم، پس از هر یک از تقسیمات متوالی درازای تلومر کاهش می‌یابد تا به حد آستانه‌ای از کوتاه شدن می‌رسد که در این حالت تلومر کوتاه شده مانند سدی در برابر تقسیمات سلولی عمل می‌کند و مانع انجام تقسیمات بیشتر می‌گردد. اما در سلول‌های سرطانی که آنزیم تلومراز فعال است ادامه تقسیم‌های متوالی به دلیل بیان بالای آنزیم تلومراز ممکن می‌شود و سلول به سمت نامیرایی (immortalization) و تومور زایی پیش می‌رود.^{۲۰-۱۷}

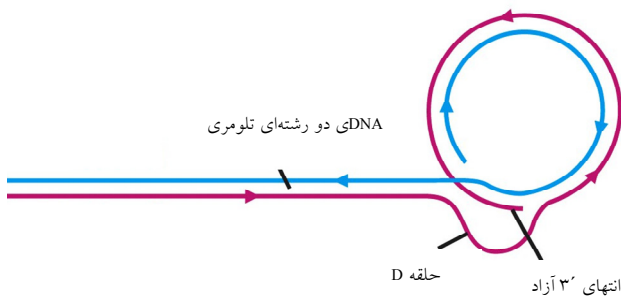


شکل ۱- فعال شدن آنزیم تلومراز به نامیرایی و تومورزایی منجر می‌شود^{۱۹}

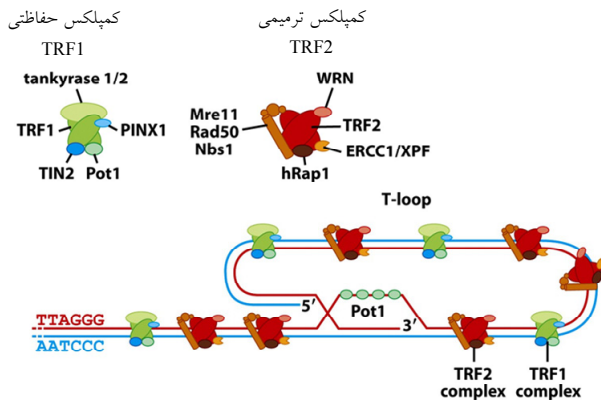
Olovinkov توانست بین end replication problem که توسط واتسن و senescence که توسط هیفلیک بیان شده بودند ارتباط برقرار کند. او چنین استنباط کرد که end replication problem موجب کوتاه شدن تلومر در تقسیمات سلولی متوالی می‌شود و تلومر مانند یک ساعت درونی (internal clock) عمل کرده و تعیین کننده تعداد تقسیمات سلولی است که یک سلول می‌تواند انجام دهد و در روند پیری (aging) نیز نقش دارد.^{۸-۶} در سال ۱۹۷۵، Blackburn و Gall پژوهش‌های خود را در این زمینه بر روی یک پرتوزوا مژکدار به نام *Tetrahymena thermophila* که تلومرهای درازی داشت آغاز کردند و در سال ۱۹۷۸ در انتهای کروموزوم توالی‌های تکراری CCCCAA را به‌عنوان توالی احتمالی تلومری شناسایی کردند. سپس Szostak در آزمایشی تلومر *Tetrahymena* را که توسط Blackburn و Gall کشف شده بود در دو انتهای پلاسمید خطی مخمر قرار داد و ملاحظه کرد که این پلاسمید به‌شکل پایدار در مخمر همانندسازی می‌شود. Szostak و Blackburn با توجه به بلندتر شدن تلومر *Tetrahymena* در دو انتهای پلاسمید خطی مخمر نتیجه گرفتند که چون مخمر قادر به شناسایی و استفاده از توالی تلومری یک ارگانسیم با فاصله تکاملی زیاد است پس مکانیسم همانندسازی تلومر از لحاظ تکاملی در بین موجودات حفاظت شده است و این دراز سازی تلومر در اثر کارکرد یک آنزیم ایجاد می‌شود.^{۲۱} سرانجام در سال ۱۹۸۴ Blackburn و Greider پس از پژوهش‌های خود بر روی عصاره *Tetrahymena* آنزیمی را شناسایی کردند که موجب حفظ طول تلومر می‌شد و آن را ترانسفراز انتهایی تلومر (telomere terminal transferase) نام نهادند که بعداً تلومراز نام گرفت. حدود پنج سال بعد یعنی در سال ۱۹۸۹، Gregg فعالیت آنزیم تلومراز را در سلول‌های سرطانی کشف کرد که مسوول نامیرایی در سلول‌های سرطانی است (immortalization). سپس Greider بیان کرد که آنزیم تلومراز تقریباً در همه سلول‌های طبیعی سوماتیک وجود ندارد.^{۱۲-۹} کارهای Blackburn یک شاخص در زیست شناسی بود، آنها از یک سو ارتباط بین کوتاه شدن پیوسته تلومر و تقسیمات متوالی را بیان کرد و از سوی دیگر کوتاه شدن تلومر و مکانیسم مربوط به آنرا برای تشخیص سرطان و نیز به‌عنوان یک هدف در درمان سرطان پیشنهاد کرد. در سلول‌های طبیعی کوتاه شدن تلومر مانند یک مکانیسم مهارکننده تومور (tumor suppressor) عمل کرده، رفته‌رفته

تشکیل شده است. TRF1، مجموعه‌ای حفاظتی است و دارای پروتیین‌هایی مانند TRF1، POT1 است که عمل حفاظت از تلومر را در برابر آنزیم‌هایی مانند اگزونوکلازها انجام می‌دهند. TRF2، مجموعه‌ای ترمیمی است که دارای پروتیین‌های ترمیمی مانند Mre11 و Rad50 است و در فرایند ترمیم بخش‌های آسیب دیده DNA نقش دارند (شکل ۴). برخی پروتیین‌ها مانند TRF1 و TRF2 به DNA دو رشته‌ای تلومر متصل می‌شوند و شماری دیگر مانند Pot1 به DNA تک رشته موجود در ساختار تلومر متصل می‌شوند.^{۲۳}

تلومر ساختاری پویا (dynamic) است و پروتیین‌های اتصالی به آن مرتباً در رفت و آمد هستند و در هنگام همانندسازی نیز این ساختار باز شده و تا آنجا که ممکن است همانندسازی انجام گیرد.^{۲۴} در هر همانندسازی آنزیم DNA پلیمرز قادر نیست بخش انتهایی تلومر را به نحو کامل همانندسازی کند و پلیمرز قادر نیست آخرین قطعه‌اکازاکی



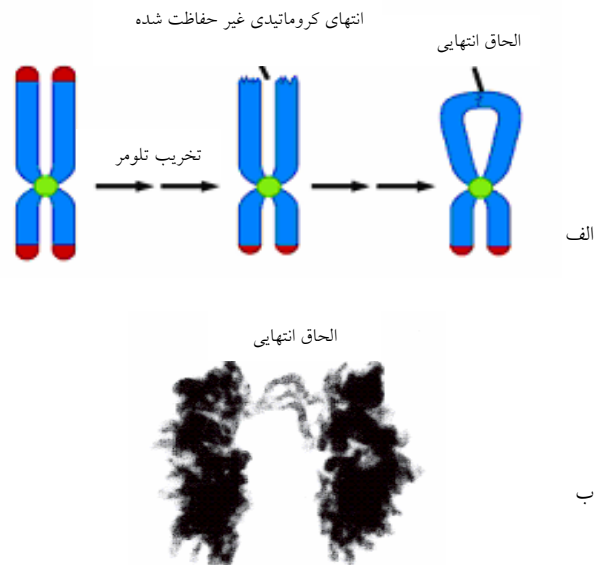
شکل-۳: ساختار تلومر شامل دو حلقه T (T loop) و D (D loop)^{۲۳}



شکل-۴: قرارگیری مجموعه‌های پروتیینی TRF1 و TRF2 بر روی DNA تلومری و ایفای نقش‌هایی مانند حفاظت و ترمیم در این ناحیه^{۲۳}

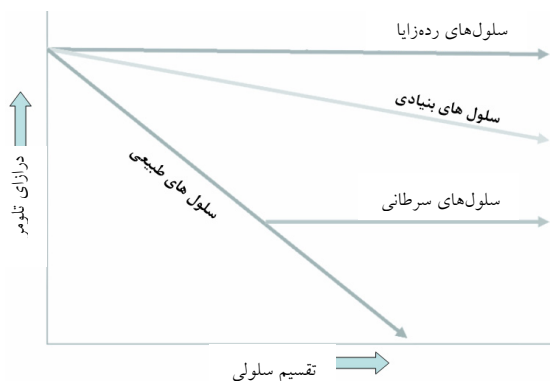
ساختار تلومر: تلومر ساختار انتهایی کروموزوم در یوکاریوت‌ها است که وظیفه حفاظت از انتهای کروموزوم را بر عهده دارد و با بیانی ساده می‌توان آن را مانند ساختار انتهای بند کفش دانست که مانع تجزیه و تخریب آن می‌شود.^{۲۱} در انسان و مهره‌داران تلومر از هزاران تکرار ۳'-TTAGGG-۵' که به شکل پشت سر هم (tandem) در انتهای کروموزوم قرار دارند، تشکیل شده است. DNA تکراری موجود در این ناحیه همراه با گروهی از پروتیین‌ها، ساختاری به نام تلومر را شکل می‌دهند که وظیفه اصلی آن حفاظت و پایداری کروموزوم می‌باشد. تلومر انتهای کروموزوم را از تجزیه شدن (degeneration)، نوآرایی (rearrangement) و الحاق انتهایی (end to end fusion) حفظ می‌کند.^{۲۲} (شکل-۲ الف و ب).

DNA موجود در ساختار تلومر دارای چندین جایگاه اتصالی (binding site) برای پروتیین‌های شلترین (shelterin) می‌باشد.^{۲۳} تلومر، ساختاری دو رشته‌ای واقع در انتهای کروموزوم است که در انتهای ۳' تک رشته‌ای می‌شود و این بخش رشته مکمل ندارد. این انتهای ۳' آزاد به کمک مجموعه پروتیینی به نام شلترین (shelterin) دچار تاخوردگی می‌شود. در اثر این تاخوردگی در ساختار تلومر دو حلقه T (T loop) و D (D loop) پدید می‌آید. حلقه T تلومری (Telomeric loop) و D loop حلقه جایگزینی (Displacement loop) هستند.^{۲۴} (شکل ۳). شلترین از دو مجموعه به نام‌های TRF1 و TRF2



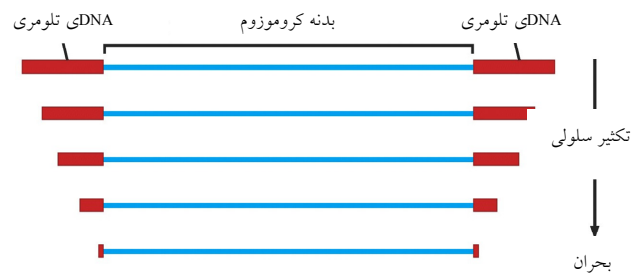
شکل-۲: الف- اتصال پایانه‌های کروموزومی (تلومرها) به هم در اثر تخریب آنها، ب- تصویر میکروسکوپ الکترونی از الحاق انتهایی^{۲۳}

ساختار تلومراز: سه مکانیسم کلی برای افزایش درازای تلومر در موجودات یوکاریوت وجود دارد: ۱- مکانیسم کلی و غالب در انسان و اغلب موجودات یوکاریوت استفاده از آنزیم تلومراز است. ۲- در دروزوفیلا، DNA تلومری به وسیله انتقال رتروترانسپوزون‌های ویژه‌ای به نام HeT-A و TART به انتهای کروموزوم افزایش می‌یابد. ۳- در مخمر DNA تلومری توسط کروموزوم‌های هومولوگ (هم ساخت) و کروموزوم‌های غیر هومولوگ افزایش می‌یابد.^{۲۳} انتهای ۳' تلومر (3' overhang) تک‌ رشته است و توانایی جفت شدن را با توالی الگوی تلومراز را دارد.^۸ آنزیم تلومراز یک ترانسکریپتاز معکوس است که با استفاده از ملکول RNA به‌عنوان الگو می‌تواند مولکول DNA را سنتز کند. تلومراز، یک DNA پلیمرز وابسته به RNA است. آنزیم تلومراز انسانی یک ریبونوکلوپروتئین است که از دو بخش پروتئینی و RNAی ساخته شده است. مجموعه پروتئینی آنزیم، ترانسکریپتاز معکوس تلومراز انسانی (hTERT) گفته می‌شود و در واقع نقش آنزیمی را انجام می‌دهد. بخش hTERT دارای ۱۱۳۲ اسید آمینه با وزن ملکولی ۱۲۷kd و فعالیت آنزیمی تلومراز مربوط به hTERT است. افزون بر بخش پروتئینی، آنزیم تلومراز دارای یک RNA به‌عنوان الگو است که به آن، RNA تلومراز انسانی (hTR) گفته می‌شود. hTR دارای ۴۴۵ نوکلئوتید است که در انسان ۱۱ نوکلئوتید آن نقش الگو را در سنتز توالی هگزامری تلومر (TTAGGG) ایفا می‌کند.^{۲۱} در جریان تقسیم سلولی ساختار تلومر به نحو کنترل شده و موقتی باز می‌شود تا آنزیم تلومراز بتواند به انتهای تک رشته تلومر (انتهای ۳') دسترسی



شکل-۶: کاهش درازای تلومر با تقسیمات متوالی در سلول طبیعی، موجب مرگ برنامه‌ریزی شده (آپوپتوز) می‌شود. اگر سلول بتواند از کوتاه شدن بیش از حد تلومر جلوگیری کند، سرطانی و نامیرا می‌گردد. سلول‌های رده‌زایا و بنیادی دارای فعالیت تلومراز و تلومر درازتری در مقایسه با سلول طبیعی سوماتیک هستند.^۶

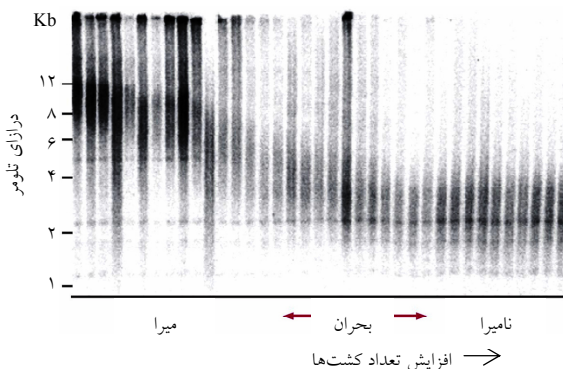
را سنتز کند، این رویداد در گذشته به نام End replication problem مطرح شده بود.^{۲۵} از سویی در اثر فعالیت آگزونوکلازها، که موجب تجزیه انتهای خطی DNA می‌شوند، این ناحیه از کروموزوم نیز تا حدی تجزیه می‌شود. بنابراین در هر تقسیم سلولی به شکل پیوسته بخشی از درازای تلومر کوتاه می‌شود. کوتاه شدن پیوسته تلومر به جدا شدن یک سری از پروتئین‌ها از ساختار تلومر و تغییر بیان ژن منجر می‌شود. این رخداد، پیامدهای مهمی را در سرنوشت سلولی به دنبال دارد. بر اساس اثر مکانی تلومر (Telomere position effect)، وجود تلومر موجب سرکوب ژن‌های مجاور و مانع بیان این ژن‌ها می‌شود. کوتاه شدن تلومر به نوبه خود موجب کاهش قلمرو اثر آن در سرکوب ژن‌های مجاور می‌گردد، و ژن‌هایی که تاکنون خاموش بوده‌اند، روشن می‌شوند. در این حالت تلومر کوتاه شده دیگر نقش حفاظتی را مانند پیش نمی‌تواند برای کروموزوم ایفا کند، در نتیجه در تقسیمات سلولی بالا و بالا رفتن سن، تجزیه شدن کروموزوم، نوآرایی و الحاق انتهایی در کروموزوم‌ها مشاهده می‌شود که در نهایت به ایجاد بحران (crisis) در سلول منجر می‌شود (شکل ۵). تلومر کوتاه شده در واقع مانند پیامی است که سلول بیشتر از این نباید به تقسیمات خود ادامه دهد. در سلول میرا (mortal) پس از این مرحله عدم فعالیت سلولی (senescence) وجود دارد که تکثیر سلولی متوقف می‌شود و به دنبال آن مرگ سلولی (apoptose) پیش می‌آید.^{۲۶،۲۷} البته چنانچه در این فرایند رو به مرگ سلولی، سلول در مرحله بحران بتواند به نحوی از کوتاه شدن بیشتر تلومر جلوگیری کند می‌تواند از مرگ گریخته و به تقسیمات خود ادامه داده و نامیرا (immortal) شود. در خلال فرایند سرطانی شدن، سلول توموری دارای تغییرات ژنتیکی و اپی‌ژنتیکی می‌شود که به آنها اجازه فرار از تنظیم سلولی طبیعی را می‌دهد. یکی از مهم‌ترین این مکانیسم‌ها فعال شدن تلومراز است (شکل ۶).^{۱۹}



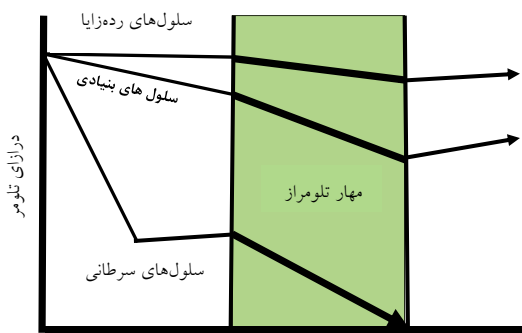
شکل-۵: بحران در سلول در اثر کوتاه شدن پیوسته تلومر در حین تقسیم سلول^{۲۳}

فعالیت بالای تلومراز در این دو رده سلولی، آیا استفاده از عامل‌های مهار کننده تلومراز موجب آسیب به این دو رده سلولی نیز می‌شود؟ در پاسخ به این پرسش باید به این نکته نیز توجه کرد که با اینکه سطح آنزیم تلومراز در این دو رده سلولی مانند سلول سرطانی بالا است، اما در اندازه تلومر با سلول سرطانی متفاوتند و بلندتر بودن درازای تلومر در این سلول‌ها در مقایسه با سلول سرطانی موجب می‌شود که عامل‌های مهار کننده تلومراز اثر چندانی بر این سلول‌ها نداشته باشند (شکل ۹).^{۳۱،۳۲}

مهار تلومراز: با توجه به اهمیت تلومراز در سرطان تاکنون روش‌های گوناگونی برای مهار این آنزیم پیشنهاد شده است که هر روش دارای



شکل ۸- سلول سرطانی (نامیرا) در مقایسه با سلول طبیعی (میرا) تلومر کوتاه‌تر دارد^{۳۳}



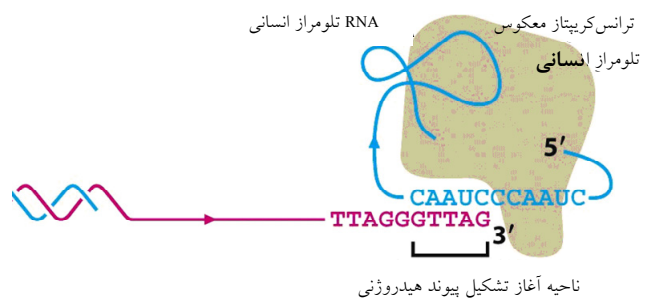
تقسیم سلولی

شکل ۹- کوتاه‌تر بودن درازای تلومر در سلول سرطانی در مقایسه با سلول‌های رده زایا و بنیادی موجب می‌شود که عامل‌های مهار کننده تلومراز در یک بازه زمانی محدود، سلول‌های سرطانی را به سمت مرگ پیش ببرند، اگرچه تاثیر چندانی بر سلول‌های رده زایا و بنیادی نداشته باشد. از سویی سلول طبیعی تقریباً فاقد فعالیت آنزیم تلومراز است در نتیجه استفاده از عامل‌های مهار کننده تلومراز نمی‌تواند روی این سلول‌ها اثر ویژه‌ای داشته باشد^{۱۱}

پیدا کند و سنتز تلومر را انجام دهد. آنزیم تلومراز در مرحله S از چرخه سلولی بیان شده و فعال است و در همین مرحله از چرخه سلولی است که واحدهای هگزامر را به انتهای کروموزوم اضافه می‌کند. تلومراز واحدهای هگزامر را تنها به شکل تک‌رشته به انتهای ۳' آزاد تلومر اضافه می‌کند و پلیمراز با سنتز رشته مقابل آن را دو رشته می‌کند (شکل ۷).^{۳۴}

چنانچه اشاره شد، تلومراز آنزیمی است که در انسان توالی تلومری (TTAGGG) را در انتهای کروموزوم‌ها سنتز می‌کند. در خلال تکثیر سلولی، کروموزوم‌ها به نحو پیوسته از انتهای تلومر در حال کوتاه شدن هستند که این کوتاه شدن درازای تلومر، در نهایت به توقف تکثیر سلولی منجر می‌شود. کوتاه شدن مداوم تلومر به توقف چرخه سلولی (cell arrest) و مرگ سلولی (cell death) می‌انجامد.^{۲۷،۲۶،۲۹}

۹۰٪ سرطان‌ها برای ادامه روند تکثیر به سطح بالایی از آنزیم تلومراز نیازمندند^{۲۹،۱۱} و با وجود سطح بالای آنزیم تلومراز در سلول سرطانی، درازای تلومر در این سلول‌ها کوتاه‌تر از سلول طبیعی (سوماتیک) است (شکل ۸). از آنجا که سطح این آنزیم در سلول طبیعی بسیار پایین است استفاده از عامل‌های مهار کننده تلومراز اثر بسیاری بر سلول طبیعی نمی‌تواند داشته باشد. با توجه به اینکه سلول طبیعی و بافت توموری در بیان تلومراز، درازای تلومر و سینتیک سلولی تفاوت دارند، تلومراز می‌تواند یک هدف مناسب در درمان و مهار سرطان به حساب آید.^۴ در بدن انسان افزون بر سلول سرطانی، سلول‌های بنیادی (stem cells)، سلول‌های رده زایا (germ cells) و سلول‌های رویانی (fetal cells) نیز دارای سطح بالایی از آنزیم تلومراز هستند. با این وضعیت، این پرسش پیش می‌آید که با توجه به



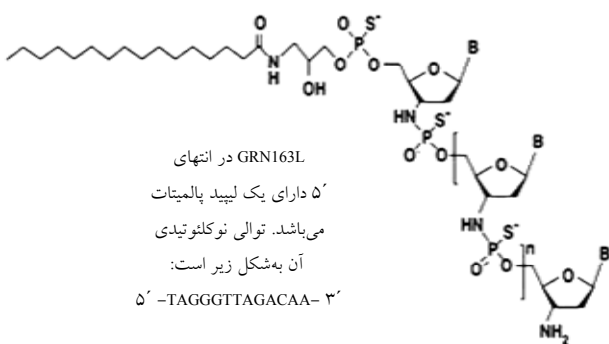
شکل ۷- آنزیم تلومراز از دو جزء پروتئینی و RNA تشکیل شده است. بخشی از این RNA با توالی تلومری، توسط پیوندهای هیدروژنی متصل شده و سپس جزء پروتئینی با فعالیت آنزیمی خود موجب سنتز این ناحیه از تلومر می‌شود^{۳۳}

و از سویی این دارو اثرات جانبی (side effects) خاصی در بیمار به وجود نمی‌آورد و به‌خوبی توسط بیمار قابل تحمل است. GRN163L، شکل تکامل‌یافته‌تری از GRN163 است که نسبت به GRN163 دارای تغییرات (modification) خاصی است. این مولکول در انتهای ۵' دارای لیپید پالمیتات است، که موجب جذب (uptake) بیشتر این مولکول توسط سلول می‌شود. GRN163L نسبت به GRN163، هفت برابر IC50 کمتری داراست و این مولکول به دلیل پایداری، عدم رانده شدن از سلول و اثر در غلظت پایین، اولین مهارکننده تلومراز بود که توانست وارد درمانگاه شود (شکل ۱۱).^{۳۹} GRN163L ظاهراً قوی‌ترین مهارکننده تلومراز تاکنون است.^{۲۵}

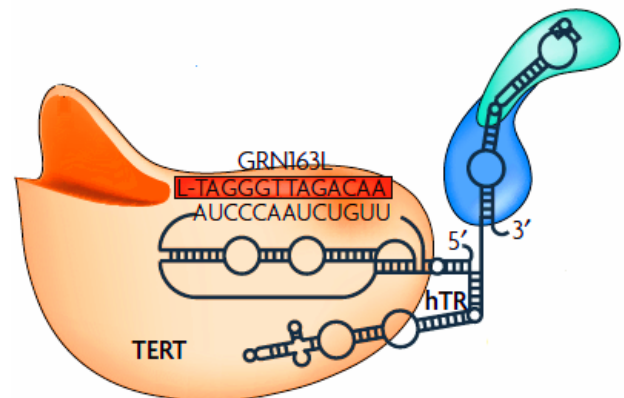
۲- ایمنی درمانی تلومراز: به دلیل سطح بالای آنزیم تلومراز در سلول سرطانی به‌شکل طبیعی قطعه‌هایی از این آنزیم به‌دنبال تجزیه شدن به‌شکل پادگن در سطح سلول قرار می‌گیرد. ایمنی درمانی تلومراز عبارت است از تحریک و تقویت سیستم ایمنی بیمار در جهت کشتن سلول‌های توموری که دارای قطعه‌هایی از آنزیم تلومراز بر سطح خود هستند. در این روش سلول‌های عرضه کننده، پادگن را در شرایط *in vitro* و یا *in vivo* در مجاورت مقادیر بالایی از پپتیدهای hTERT قرار می‌دهند. سپس این سلول‌ها توانایی فعال کردن سلول‌های T (CD4 و CD8) را به‌دست آورده و موجب به‌کارگیری سلول‌های T در جهت کشتن سلول‌های توموری دارای پادگن hTERT می‌گردند (شکل ۱۲). برای جلوگیری از ایجاد اثر نامطلوب بر سلول‌های بنیادی و سلول‌های رده زایا این روش به‌شکل موضعی انجام می‌شود.^{۳۸،۳۹} موانع و فرصت‌های پیش‌رو: پیرامون استفاده از روش‌های مهار تلومراز در مهار سرطان نکاتی را باید مد نظر قرار داد که می‌توانند ما را در درک بهتر و انتخاب رویکرد درمانی مناسب در آینده یاری کنند.

معایب و مزایایی است که استفاده از آنها را در درمان محدود می‌کند.^{۳۰-۳۶} در این بین به‌نظر می‌رسد برخی روش‌ها مشتمل بر دو مورد، دارای اثرات مناسب‌تری در درمان هستند.

۱- مهار مستقیم تلومراز: BIBR1532 یکی از مولکول‌هایی است که موجب مهار تلومراز می‌شود اما اثر ضد توموری آن به‌حدی نیست که بتواند وارد درمانگاه شود.^{۳۷،۳۸،۳۹} آزیدوتیمیدین (AZT) یک مهارکننده نوکلئوزیدی است که موجب مهار تلومراز می‌شود اما این مهارکننده توانایی تشخیص بین تلومراز و سایر آنزیم‌های پلیمرز درون سلول را ندارد و از این جهت نمی‌تواند اثر مطلوبی در درمان داشته باشد.^{۲۰} RNAi یک مولکول دو رشته RNA است که به mRNA هدف متصل می‌شود و از بیان آن جلوگیری می‌کند. استفاده از RNAi برای مهار تلومراز موجب کوتاه شدن تلومر و القای مرگ سلولی در سلول‌های انسانی می‌شود،^{۳۵} اما استفاده از RNAi موجب ایجاد پاسخ ایترفرن سلولی نیز می‌شود و از سویی در این روش بیان برخی از ژن‌ها تغییر می‌کند و RNAi در مهار بیان ژن‌ها می‌تواند تا حدی غیر اختصاصی عمل می‌کند.^{۱۶،۱۷} GRN163 و GRN163L توالی‌های ۱۳ نوکلئوتیدی از DNA هستند که به‌شکل آنتی سنس به بخش الگوی hTR متصل می‌شوند و آنرا مسدود کرده و مانع دسترسی hTR آنزیم تلومراز به انتهای تلومر می‌شوند (شکل ۱۰).^{۲۰،۲۵} از ویژگی‌های بارز مولکول GRN این است که برخلاف اکثر داروهایی که در شیمی‌درمانی سرطان استفاده می‌شود توسط ناقل‌های ABC (ABC transporters) شناسایی نشده و به بیرون از سلول رانده (efflux) نمی‌شوند. بدین ترتیب با غلظتی پایین از دارو می‌توان به اثرات دلخواه در بیمار دست پیدا کرد

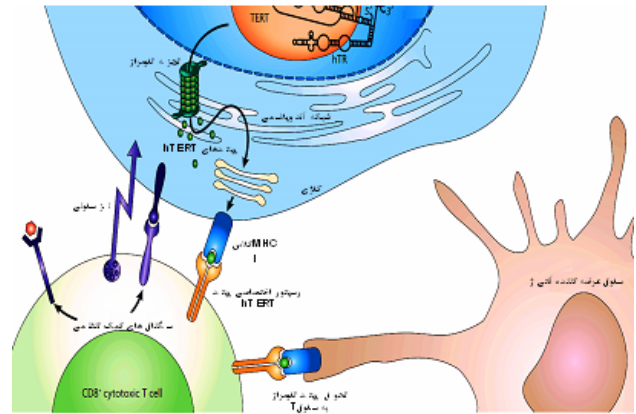


شکل-۱۱: ساختار مولکول GRN163L و توالی آن^۱



شکل-۱۰: مولکول GRN163L با ناحیه الگوی RNA تلومراز جفت‌شده و از اتصال این ناحیه به تلومر جلوگیری می‌کند^۸

پیام‌رسانی به تولید داروهای جدیدتر منجر می‌شود. استفاده بلندمدت از داروهای مهارکننده تلومراز می‌تواند بر سلول طبیعی نیز اثر گذار باشد و یا ممکن است سلول‌های سرطانی به درمان مقاوم شوند برای نمونه در مورد ایمنی درمانی تلومراز، ممکن است بیان پادگن hTERT با مرور زمان در سطح سلول سرطانی کاهش یابد و یا ممکن است سیستم ایمنی بیمار نسبت به پادگن قرار گرفته در سطح سلول سرطانی سازش پیدا کرده و سرکوب شود.^{۳۹،۴۰ و ۷} در حدود ۱۰ تا ۱۵ درصد از سرطان‌ها برای حفظ درازای تلومر از مکانیسم چندشکلی طولی جایگزین (Alternative Lengthening of Telomeres) به جای مکانیسم تلومراز استفاده می‌کنند. مکانیسم ALT نوعی نوترکیبی بین تلومرها است که در این حالت درازای تلومرها با هم متفاوت است و یک سلول دارای کروموزوم‌هایی با طول‌های متفاوت می‌باشد.^{۴۱} این احتمال در آینده وجود دارد که سرطان‌هایی که امروزه از مکانیسم تلومراز استفاده می‌کنند در اثر مهار تلومراز دارای مکانیسم ALT شوند.^{۴۲}



شکل-۱۲: مواجه سلول‌های عرضه‌کننده پادگن (APC) با قطعه‌هایی از آنزیم تلومراز، به این سلول‌ها این امکان را می‌دهد که پس از ورود به بدن، سلول‌های T را برای از بین بردن سلول‌های سرطانی فعال کنند^{۴۲}

تاکنون نقش تلومر و تلومراز در زیست‌شناسی سلول طبیعی و آسیب‌شناسی سرطان کاملاً شناخته نشده است، شناخت دقیق این مسیر

References

- Lilian C. Telomere and Telomerase: brief review of a history initiated by Hermann Müller and Barbara McClintock. *Colombia Med* 2006;37(4):336-9.
- نوری دلویی محمدرضا در ترجمه اصول ژنتیک پزشکی امری (مؤلف). چاپ پنجم. تهران: انتشارات نشر جامعه نگر، ۱۳۸۸.
- Phatak P, Burger AM. Telomerase and its potential for therapeutic intervention. *Br J Pharmacol* 2007;152(7):1003-11.
- Mu J, Wei LX. Telomere and telomerase in oncology. *Cell Res* 2002;12(1):1-7.
- Slijepčević P. Telomeres and human disease *Acta Medica Academica* 2007;36:24-34.
- Zimmermann S, Martens UM. Telomeres and telomerase as targets for cancer therapy. *Cell Mol Life Sci* 2007;64(7-8):906-21.
- Liu JP. Studies of the molecular mechanisms in the regulation of telomerase activity. *FASEB J* 1999;13(15):2091-104.
- Harley CB. Telomerase and cancer therapeutics. *Nat Rev Cancer* 2008;8(3):167-79.
- Wai LK. Telomeres, telomerase, and tumorigenesis: a review. *MedGenMed* 2004;6(3):19.
- Ahmed A, Tollefsbol T. Telomeres, telomerase, and telomerase inhibition: clinical implications for cancer. *J Am Geriatr Soc* 2003;51(1):116-22.
- Capezone M, Cantara S, Marchisotta S, Filetti S, De Santi MM, Rossi B, et al. Short telomeres, telomerase reverse transcriptase gene amplification, and increased telomerase activity in the blood of familial papillary thyroid cancer patients. *J Clin Endocrinol Metab* 2008;93(10):3950-7.
- Hiyama E, Hiyama K. Telomere and telomerase in stem cells. *Br J Cancer* 2007;96(7):1020-4.
- Shahabi M, Noori Daloii MR, Langan JE, Rowbottom L, Jahanzad E, Khoshbin E, et al. An investigation of the tylosis with oesophageal cancer (TOC) locus in Iranian patients with oesophageal squamous cell carcinoma. *Int J Oncol* 2004;25(2):389-95.
- Momeny M, Khorramizadeh MR, Ghaffari SH, Yousefi M, Yekaninejad MS, Esmaeili R, et al. Effects of silibinin on cell growth and invasive properties of a human hepatocellular carcinoma cell line, HepG-2, through inhibition of extracellular signal-regulated kinase 1/2 phosphorylation. *Eur J Pharmacol* 2008;591(1-3):13-20.
- Kleideiter E, Piotrowska K, Klotz U. Screening of telomerase inhibitors. *Methods Mol Biol* 2007;405:167-80.
- Sledz CA, Holko M, de Veer MJ, Silverman RH, Williams BR. Activation of the interferon system by short-interfering RNAs. *Nat Cell Biol* 2003;5(9):834-9.
- Tian X, Chen B, Liu X. Telomere and Telomerase as Targets for Cancer Therapy. *Appl Biochem Biotechnol* 2009 May 2.
- Pacini F, Cantara S, Marchisotta S. Genetics anticipation and telomere-telomerase complex dysfunction in familial dysfunction in familial non medullary thyroid cancer. Article, 06/09.
- Li H, Liu JP. Signaling on telomerase: a master switch in cell aging and immortalization. *Biogerontology* 2002;3(1-2):107-16.
- Cunningham AP, Love WK, Zhang RW, Andrews LG, Tollefsbol TO. Telomerase inhibition in cancer therapeutics: molecular-based approaches. *Curr Med Chem* 2006;13(24):2875-88.
- Gottschling DE, Stoddard B. Telomeres: structure of a chromosome's aglet. *Curr Biol* 1999;9(5):R164-7.
- Haider S, Neidle S. A molecular modl for drug binding to tandem repeats of telomeric G-quadruplexes. *Biochem Soc Trans* 2009;37(Pt 3):583-8.
- Chapter 10. Eternal life: cell immortalization and tumorigenesis. In: Weinberg RA. *The Biology of Cancer*. New York: Garland Science; 2007. p. 357-98.
- Blackburn EH. Telomerase and Cancer: Kirk A. Landon: AACR prize for basic cancer research lecture. *Mol Cancer Res* 2005;3(9):477-82.
- Parkinson EK, Minty F. Anticancer therapy targeting telomeres and telomerase : current status. *BioDrugs* 2007;21(6):375-85.

۲۶. نوری دلویی محمدرضا، یعقوبی محمد مهدی. آپوتوز یا مرگ برنامه ریزی شده سلول و رابطه آن با سرطان. مجله رازی ۱۳۷۸: سال ۱۱، شماره ۱: صفحات ۱۱۱ تا ۱۱۲ و ۱۱۷ تا ۱۲۷.
۲۷. نوری دلویی محمدرضا، یعقوبی محمد مهدی. آپوتوز یا مرگ برنامه ریزی شده سلول و رابطه آن با سرطان. مجله رازی ۱۳۷۸: سال ۱۱، شماره ۲: صفحات ۱۱ تا ۱۱۲ و ۱۱۸ تا ۱۳۶.
28. Tomlinson RL, Abreu EB, Ziegler T, Ly H, Counter CM, Terns RM, et al. Telomerase reverse transcriptase is required for the localization of telomerase RNA to cajal bodies and telomeres in human cancer cells. *Mol Biol Cell* 2008;19(9):3793-800.
29. Curran AJ, St Denis K, Irish J, Gullane PJ, MacMillan C, Kamel-Reid S. Telomerase activity in oral squamous cell carcinoma. *Arch Otolaryngol Head Neck Surg* 1998;124(7):784-8.
۳۰. نوری دلویی محمدرضا، نوروزی آذین. جایگزینی ژن نشانه گیری شده. مجله رازی ۱۳۷۴: سال ۶، شماره ۹: صفحات ۲۶ تا ۳۸.
۳۱. نوری دلویی محمدرضا، نوروزی آذین. جایگزینی ژن نشانه گیری شده مجله رازی ۱۳۷۴: سال ۶، شماره ۱۰: صفحات ۲۴ تا ۳۲.
۳۲. نوری دلویی محمدرضا. نظری بر ژن درمانی و چشم انداز آن. مجله اورولوژی ایران ۱۳۷۳: سال ۱، شماره ۴: صفحات ۶۵ تا ۷۵.
۳۳. نوری دلویی محمدرضا. نظری بر حال و آینده مهندسی ژنتیک و پزشکی مولکولی. مجله نبض ۱۳۷۴: سال ۴، شماره ۱۰: صفحات ۴ تا ۸.
۳۴. نوری دلویی محمدرضا. نظری بر ژن درمانی و چشم انداز آن. مجله اورولوژی ایران ۱۳۷۴: سال ۲، شماره ۵ و ۶: صفحات ۱۳ تا ۲۱.
۳۵. نوری دلویی محمدرضا، الوندی احسان. ریز RNA: کوچک اما راهبردی و پر رمز و راز. مجله دانشکده پزشکی، دانشگاه علوم پزشکی تهران (TUMJ) ۱۳۸۵: دوره ۶۴، شماره ۶: صفحات ۵ تا ۱۹.
۳۶. نوری دلویی محمدرضا، غفرانی محمد. نانو فناوری در تشخیص آزمایشگاهی و پزشکی مولکولی، اهمیت و چشم انداز. فناوری نانو ۱۳۸۶: شماره ۱۲۳: صفحات ۵۹۷ تا ۶۰۸.
37. El Daly H, Martens UM. Telomerase inhibition and telomere targeting in hematopoietic cancer cell lines with small non-nucleosidic synthetic compounds (BIBR1532). *Methods Mol Biol* 2007;405:47-60.
38. Fedorov Y, King A, Anderson E, Karpilow J, Ilsley D, Marshall W, et al. Different delivery methods-different expression profiles. *Nat Methods* 2005;2(4):241.
۳۹. نوری دلویی محمدرضا. ژنتیک پزشکی در هزاره سوم. چاپ شده در کتاب اولین همایش ملی تازه های سلولی-مولکولی در بیماری های غیر واگیر؛ دانشگاه علوم پزشکی بابل ۱۳۸۸: صفحات ۱۸ تا ۳۲.
40. Noori-Dalooi MR, Swift RA, Kung HJ, Crittenden LB, Witter RL. Specific integration of REV proviruses in avian bursal lymphomas. *Nature* 1981;294(5841):574-6.
41. Jegou T, Chung I, Heuvelman G, Wachsmuth M, Görisch SM, Greulich-Bode KM, et al. Dynamics of telomeres and promyelocytic leukemia nuclear bodies in a telomerase-negative human cell line. *Mol Biol Cell* 2009;20(7):2070-82.

Telomerase and it's inhibition in caner: *a review article*

Received: October 04, 2009 Accepted: October 24, 2009

Abstract

Noori-Dalooi M.R.*
Hesami S.S.

Department of Medical Genetics,
School of Medicine

Tehran University of Medical
Sciences

Telomere, by which is a terminal structure of eukaryotic chromosomes was discovered at first in 1938 and has a vital role in chromosome protection. Telomere in human and other vertebrates consists of thousands of 5'-TTAGGG-3' tandem repeats at the end of the chromosome, has a main role in the chromosome stability. Telomere protects the end of the chromosome from degeneration, rearrangement and end to end fusion. There is a telomere loss at every cell division. Progressive loss in telomere length results in disassociation of telomere binding proteins and change in gene expression profiles. Adjacent genes are suppressed by the telomere effect so the telomere loss results in adjacent gene expressions. Apoptosis and replicative senescence are caused by progressive telomere loss. There are three mechanisms for increasing telomere length in eukaryotes and telomerase is the predominant mechanism. Telomerase can synthesize telomere, without the template. Telomerase is overexpressed In 90% of cancers. Therefore cancerous cells compensate the telomere loss in every cell division because of telomerase. In conclusion, telomerase is a proper target for cancer therapy and many methods including direct inhibition of telomerase and immunotherapy have been introduced.

Keywords: Telomerase, inhibition, caner, molecular diagnosis.

* Corresponding author: School of
Medicine, Tehran University of Medical
Sciences, Tehran, Iran
Tel: +98-21-88953005
email: nooridalooi@sina.tums.ac.ir