

دسته بندی اسید های آمینه های هلیکس های غشایی در پروتئین انتقال دهنده ی سروتونین انسانی

علی شریعت پناهی^۱، محمد تقی زاده^{۲*}، بهرام گلیایی^۲، آرمین مددکار سبحانی^۲

(۱) گروه زیست شناسی سلولی و مولکولی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

(۲) مرکز تحقیقات بیوشیمی و بیوفیزیک، دانشگاه تهران، تهران، ایران

تاریخ پذیرش: ۹۶/۲/۳۰

تاریخ دریافت: ۹۵/۱۱/۱۸

چکیده

مقدمه: پروتئین انتقال دهنده ی سروتونین انسانی (5-HTT) اهمیت بالایی در مطالعات طراحی دارو دارد و به تازگی شش ساختار حاصل از کریستالو گرافی از آن در دسترس قرار گرفته است. در این پژوهش با استفاده از دو مورد از این ساختارها و دو مدل ساخته شده به روش همولوژی، به مطالعه ی ترکیب اسید های آمینه ی 5-HTT پرداخته شده است تا درک بهتری از نقش ساختاری و عملکردی هلیکس های غشایی در انتقال دهنده ها، و هم چنین مزایا و معایب استفاده از مدل های همولوژی در این مطالعات مشخص شود.

مواد و روش ها: ابتدا نواحی هلیکس های غشایی در 5-HTT به وسیله ی نمودار هیدروپاتی کایت و دولیتل مشخص شد. سپس اسیدهای آمینه ی هلیکس های غشایی با استفاده از روشی نوین بر مبنای موقعیت رزیدو ها نسبت به غشای لیپیدی به ۴ دسته (رو به لیپید، رو به لومن، راست و چپ) تقسیم شدند. هم چنین دو مدل سه بعدی از 5-HTT نیز با استفاده از نرم افزار MODELLER و بر اساس الگو هایی با شباهت ۳۸ و ۶۰ درصد ساخته شد.

یافته های پژوهش: با استفاده از روش دسته بندی ابداعی توانستیم نتایج جدید و جالبی در مورد نحوه توزیع رزیدو های مختلف در ساختار انتقال دهنده ی سروتونین انسانی به دست آوریم. به طور مثال، علی رغم آن که اکثر رزیدوهای آب گریز هلیکس ها در دسته ی رو به لیپید قرار دارند، درصد قابل توجهی از آن ها در دسته ی رو به لومن حضور دارند. رزیدو های ایزو لوسین، لوسین، والین، ترئونین، آلانین و فنیل آلانین به ترتیب بیش ترین فراوانی را در دسته ی رو به لیپید دارند. بنا بر این الگوهای سه بعدی جایگیری این رزیدو ها، تعیین کننده بیشتر بر هم کنش های میان لیپید های غشایی و پروتئین و نقش این بر هم کنش ها است.

بحث و نتیجه گیری: بر اساس ضرایب همستگی، ترکیب رزیدو های دسته های رو به لیپید و راست پروتئین بیش ترین شباهت را به یکدیگر دارد. این نکته پیشنهاد می دهد که هلیکس های غشایی احتمالاً در تغییر کنفورماسیون ناشی از باز و بسته شدن انتقال دهنده، دستخوش چرخش می شوند. هم چنین مقایسه ی ساختارهای حاصل از کریستالو گرافی با مدل ها نشان می دهد استفاده از الگویی با شباهت ۳۸٪ برای مدل سازی همولوژی پروتئین های انتقال دهنده، هلیکس های غشایی را به نحو نامناسبی مدل می کند. این یافته ها می توانند در درک بهتر ساختار و عملکرد هلیکس های غشایی پروتئین های انتقال دهنده موثر باشند.

واژه های کلیدی: مطالعه در سطح رزیدو، پروتئین انتقال دهنده سروتونین انسانی، مدل سازی همولوژی، پروتئین های انتقال دهنده، هلیکس های غشایی

* نویسنده مسئول: مرکز تحقیقات بیوشیمی و بیوفیزیک، دانشگاه تهران، تهران، ایران

Email: mtaghizadeh@alumni.ut.ac.ir

Copyright © 2017 Journal of Ilam University of Medical Science. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution international 4.0 International License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>) which permits copy and redistribute the material, in any medium or format, provided the original work is properly cited.

مقدمه

مطالعاتی که بر روی پروتئین‌های غشایی دیگر صورت گرفته است، (به جز یک مورد که به جدا سازی یک هلیکس غشایی و بررسی ترکیب اسیدهای آمینه‌ی آن پرداخته است (۶))، در سایر مطالعات بخش غشایی مورد مطالعه قرار نگرفته است. در واقع در سایر مطالعات صورت گرفته بر روی ترکیب اسیدهای آمینه‌ی پروتئین‌های غشایی نیز اسیدهای آمینه‌ی بدون توجه به جهت گیری زنجیره‌ی جانبی رزیدوها مورد بررسی قرار گرفته اند. اغلب مطالعات صورت گرفته بر روی ترکیب اسیدهای آمینه‌ی پروتئین‌های سراسر غشایی، به بررسی آماری مجموعه داده‌هایی متشکل از تعدادی پروتئین با ساختار سه بعدی مشخص می‌پردازند که ساختار سه بعدی پروتئین 5-HTT در میان آن‌ها نیست. هم چنین در این مطالعات دسته بندی خاصی مشابه تحقیق حاضر، مشاهده نمی‌شود. در بعضی از این مطالعات، پروتئین‌های غشایی بررسی شده، از ساختارهای آلفا هلیکس و رشته‌های بتا تشکیل شده اند (۷) و پروتئین‌های بررسی شده در برخی مطالعات دیگر، صرفاً شامل تعدادی پروتئین هلیکسی با کیفیت و وضوح ساختاری بالا بوده اند (۸). در مطالعه‌ی دیگری که در سال ۲۰۱۰ منتشر شده است، ترکیب اسیدهای آمینه‌ی تعدادی از پروتئین‌های دارای یک گذر غشایی مورد بررسی قرار گرفته است (۹).

مهارکننده‌های 5-HTT و سایر انتقال دهنده‌های SLC6 با بیش از ۳۰ ساختار دارویی تایید شده، در درمان بیماری‌هایی نظیر افسردگی نقشی مهم ایفا می‌کنند (۳). کشف و طراحی این داروها به ویژه در سال‌های اخیر، مدیون استفاده از روش‌های حائز اهمیت بیو انفورماتیکی نظیر مدل سازی است. با توجه به این که ساختار سه بعدی بیش از ۶۰ درصد پروتئین‌های دارای اهمیت دارویی (به علت غشایی بودن و عدم امکان تهیه ی کریستال) با استفاده از روش‌هایی مانند کریستالو گرافی اشعه ایکس قابل بررسی نیست (۱)، مدل سازی به روش همولوژی ابزاری قدرتمند برای مطالعه ی این اهداف مهم دارویی و طراحی داروهای جدید محسوب می‌شود. مدل سازی به روش همولوژی کاربردهای متفاوتی دارد و مدل‌های حاصل برای اهداف گوناگون مورد استفاده قرار می‌گیرند. به عنوان

انتقال دهنده‌های دستگاه عصبی مرکزی در دو دسته‌ی SLC1 و SLC6 جای می‌گیرند. دسته‌ی بزرگ تر SLC6 در جا به جایی مونو آمین‌های بیوژنیک مانند دوپامین (DA)، نور آدرنالین (NA) و سروتونین (5-HT) و اسیدهای آمینه‌ی ای مانند گاما آمینو بوتیریک اسید (GABA) و گلیسین (Gly) ایفا نقش می‌کنند (۱). پروتئین سر تا سر غشایی انتقال دهنده‌ی سروتونین انسانی که با نام‌های 5-HTT، hSERT و SLC6A4 نیز معرفی می‌شود، به خانواده‌ی دوم تعلق دارد. این انتقال دهنده با تسهیل انتقال سروتونین در دو سوی غشاء نقش مهمی را در تنظیم مقادیر خارج سلولی این انتقال دهنده عصبی ایفا می‌کند. اهمیت پروتئین‌های غشایی مانند انتقال دهنده سروتونین زمانی بیشتر مشخص می‌شود که بدانیم بیش از ۷۵٪ از اهداف دارویی، به یکی از خانواده‌های پروتئین‌های غشایی مرتبط می‌شوند (۲). در این میان، انتقال دهنده‌ی سروتونین انسانی (5-HTT) به طور ویژه هدف طیف وسیعی از داروهای درمان افسردگی و اضطراب، و همچنین تعدادی از ترکیبات روانگردان مانند آمفتامین و اکستازی می‌باشد (۳). مطالعات ژنتیکی صورت گرفته بر روی 5-HTT هم چنین علاوه بر افسردگی، نشان از دخیل بودن این پروتئین در بیماری‌هایی نظیر نشانگان وسواس اجباری OCD (Obsessive Compulsive Disorder)، اختلالات دو قطبی و اوتیسم دارد (۴). با توجه به اهمیت بالای 5-HTT در مطالعات طراحی دارو، ساختار سه بعدی حاصل از کریستالو گرافی آن به تازگی تعیین شده و در پایگاه داده PDB قرار گرفته است (۵). این ساختار می‌تواند الگوی مناسبی برای مدل سازی دیگر پروتئین‌های انتقال دهنده‌ی انسانی باشد.

علی رغم مطالعات گسترده‌ای که بر روی 5-HTT به روش‌های مختلف انجام شده، مطالعات چندانی در سطح رزیدو بر روی بخش‌های غشایی ساختار سه بعدی این پروتئین صورت نگرفته است و لذا این پروتئین از جنبه‌هایی مانند نحوه‌ی ارتباط و عملکرد بخش‌های مرتبط با غشاء و ترکیب اسیدهای آمینه، کمتر مورد بررسی قرار گرفته است. هم چنین با وجود

اول نیز در این روش تقسیم بندی، بیشتر با فضای لومن پروتئین در ارتباط هستند و لذا به آن‌ها دسته‌ی روی به لومن گفته می‌شود. این به آن معناست که مولکول‌هایی که از فضای کانالی 5-HTT عبور می‌کنند، با اسیدهای آمینه‌ی دسته‌ی رو به لومن در ارتباط هستند. بر اساس روش جدید دسته بندی رزیدوها در پژوهش حاضر مشخص شد که ترکیب اسیدهای آمینه در این جایگاه‌هایی که در بالا به آن‌ها اشاره شد، تفاوت‌های زیادی با یکدیگر دارند. به طور کلی می‌توان گفت این مطالعات، گامی رو به جلو در زمینه‌ی ایجاد ارتباط بین ترکیب اسیدهای آمینه و نقش عملکردی پروتئین در خانواده‌ی انتقال دهنده‌های سدیمی نورو ترانسپورترها محسوب می‌شود. علاوه بر این، یافته‌های این پژوهش می‌تواند به متخصصان طراحی پروتئین اجازه دهد هلیکس‌های غشایی مناسب تری برای یک پروتئین انتقال دهنده‌ی غشایی طراحی کنند. این نتایج هم چنین شناخت ماهیت هلیکس‌های غشایی که در ساختار انتقال دهنده‌ها دیده می‌شوند را ممکن کرده و به درک بهتر مکانیزم عملکرد پروتئین‌های انتقال دهنده و پروتئین‌های مشابه با آن‌ها کمک می‌کند.

مواد و روش‌ها

ساختارهای سه بعدی مورد استفاده: ابتدا دو ساختار حاصل از کریستالو گرافی اشعه ایکس پروتئین 5-HTT شامل ساختار پروتئین بدون لیگاند (PDB ID: 5i6z) و ساختار پروتئین دارای لیگاند اس-سیتالوپرام در پاکت اتصال مرکزی (PDB ID: 5i71) از پایگاه داده PDB گرفته شد. سپس مدل سازی به روش همولوژی نیز با استفاده از دو الگوی متفاوت برای این پروتئین انجام شد. برای یافتن الگوهایی با شباهت قابل قبول و آغاز مدل سازی، ابتدا توالی پروتئین 5-HTT انسان (Lot. P31645) از Uniprot گرفته شد و سپس توسط ابزار BLAST همین پایگاه، علیه PDB جستجو صورت گرفت (۱۴). بر این اساس ساختارهای حاصل از کریستالو گرافی انتقال دهنده‌ی باکتریایی وابسته به سدیم/کلر لوسین (LeuTaa) (PDB ID: 2A65) با شباهت ۳۸٪ و انتقال دهنده‌ی

مثال مطالعات صورت گرفته در زمینه طراحی دارو با استفاده از مدلی همولوژی از 5-HTT با کیفیت بالا، تا کنون منجر به شناسایی هلیکس‌ها و اسیدهای آمینه‌ی دخیل در پاکت اتصال این پروتئین شده‌اند (۴) هم چنین با استفاده از مدل‌های ساخته شده به روش همولوژی نشان داده شده است که پاکت اتصال داروهایی از گروه SSRI مانند سیتالوپرام، با پاکت اتصال این پروتئین هم پوشانی دارد. با استفاده از این نکته، عناصر ساختاری دخیل در اتصال با تمایل بالا نیز مشخص شده‌اند (۱۰، ۱۱). اسیدهای آمینه‌ی مختلف در قسمت غشایی بر اساس جهت گیری خود، برهم کنش‌های متفاوتی با غشاء دارند و لذا عملکردهای متفاوتی از خود نشان می‌دهند. در این مقاله، بر روی اختصاصیت جایگاه رزیدوها تمرکز شده است و برای نخستین بار، اسیدهای آمینه‌ی هلیکس‌های غشایی یک ساختار حاصل از کریستالو گرافی بر اساس جهت گیری در هلیکس‌ها یا به عبارت دیگر بر اساس موقعیت اسیدهای آمینه در هلیکس (نسبت به غشا) به ۴ دسته تقسیم شده‌اند. این در حالی است که در هیچ یک از مطالعات قبلی، رزیدوهای دارای جهت گیری‌های مختلف به این روش از یکدیگر جدا نشده‌اند. یکی از اهداف بررسی ساختارهای سه بعدی پروتئین 5-HTT در این کار، مشخص کردن ترکیب رزیدوهایی است که در ارتباط با لیپیدهای غشایی قرار می‌گیرند. اهمیت این رزیدوها بویژه در مطالعات بالینی بسیار بالاست چرا که بیشتر جهش‌های ایجاد کننده‌ی نا هنجاری‌های روانی، نواحی مرتبط با لیپیدهای غشایی را تحت تاثیر قرار می‌دهند (۱۲). هم چنین بر هم کنش لیپیدهای غشایی نظیر کلسترول با پروتئین، در تنظیم فعالیت انتقالی آن نقش ایفا می‌کند (۱۳). چنان که می‌دانیم از میان ۳ یا ۴ رزیدویی که در هر دور از هلیکس حضور دارند، تنها زنجیره‌ی جانبی یکی از رزیدوها رو به غشا و در میان لیپیدهای غشایی قرار می‌گیرد و رزیدوهای دیگر در این ناحیه نبوده و جایگاه‌های دیگری دارند. به عنوان مثال رزیدوهای قرار گرفته در موقعیت‌های چپ و راست دسته‌ی رو به لیپید، در بر هم کنش‌های هلیکس-هلیکس نقش دارند و رزیدوهای قرار گرفته در موقعیت پشت دسته

شماره‌ی ۷) نسبت داده شد. سپس با حرکت یک واحدی پنجره به سمت جلو، همین روند برای رزیدوهای بعدی نیز تکرار شد. پس از تکرار همین روش با بازه‌ی ۱۹ تایی، بر اساس اعداد بدست آمده رسم نمودار صورت گرفت.

دسته بندی و آنالیزهای آماری رزیدوهای پروتئین: پس از مشخص شدن هلیکس‌های نواحی غشایی پروتئین توسط پروفایل هیدروپاتی، رزیدوهای قرار گرفته در هر دور از این هلیکس‌ها به ۴ دسته تقسیم شدند. این دسته بندی اسیدهای آمینه، پس از بررسی رزیدو به رزیدوی ساختار 5-HTT از زوایای گوناگون در یک نرم افزار نمایش دهنده ساختار ViewerLite 5.0 (accelrys) صورت گرفت. مبنای این تقسیم بندی، جهت گیری زنجیره‌ی جانبی اسیدهای آمینه نسبت به غشای لیپیدی بود. بر این اساس اسیدهای آمینه در یکی از ۴ دسته‌ی رزیدوهای رو به لیپید، راست، چپ و رو به لومن قرار گرفتند. توضیحات بیشتر در بخش نتایج قابل مشاهده است (شکل ۲). هم چنین فراوانی‌های مطلق و نسبی ۲۰ نوع اسید آمینه، با توجه به تعداد کل اسیدهای آمینه‌ی بررسی شده از پروتئین که شامل ۲۹۹ رزیدو بوده است، محاسبه و بر اساس آن نمودار فراوانی ترسیم شد. اسیدهای آمینه در نمودار فراوانی به ترتیب و بر اساس افزایش عدد شاخص هیدروپاتی کایت و دولیتل از چپ به راست منظم شده‌اند (۱۸). ضرایب همبستگی پیرسون نیز برای بررسی میزان همبستگی میان فراوانی نسبی اسیدهای آمینه‌ی ۴ دسته محاسبه شد.

یافته‌های پژوهش

تعیین رزیدوهای غشایی 5-HTT: مشخص کردن رزیدوهای در ارتباط با غشا با استفاده از ساختار حاصل از کریستالو گرافی، در مرحله اول نیازمند بررسی نواحی آب‌گریز پروتئین است. مشخص کردن مرزهای بین نواحی غشایی و غیر غشایی در هلیکس‌های غشایی با استفاده از پروفایل هیدروپاتی انجام شد. شکل ۱، پروفایل هیدروپاتی بر اساس شاخص کایت و دولیتل را برای نواحی مختلف ساختار اصلی پروتئین 5-HTT (5i6z) نشان می‌دهد. بررسی اسیدهای آمینه، دو بار و

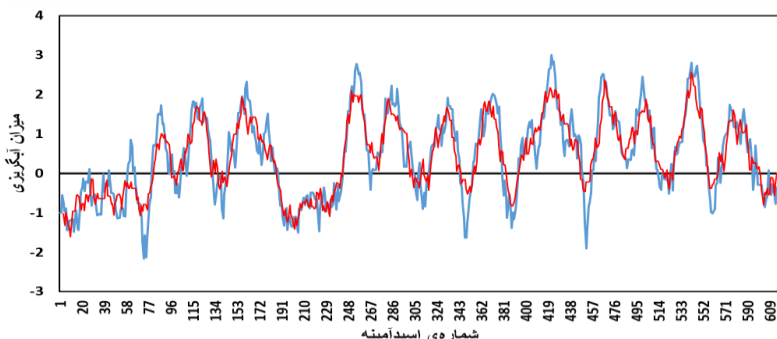
دو پامین *Drosophila melanogaster* (dDAT) (PDB ID: 4m48) با شباهت ۶۰٪ به عنوان الگو انتخاب شدند (۳). مدل سازی به روش همولوژی، با استفاده از اسکریپت‌های align2d و model single نرم افزار MODELLER 9v12 (۱۵) و با ساخت مدل برای هر یک از الگوها انجام شد. انتخاب بهترین مدل ابتدا به وسیله‌ی توابع ارزیابی نرم افزار MODELLER 9v12 شامل DOPE score و MolPdf انجام شد. برای محاسبه‌ی نمودار Dope score، اسکریپت‌های evaluate template و evaluate model از نرم افزار MODELLER مورد استفاده قرار گرفتند. در ادامه، ارزیابی مدل منتخب به وسیله خروجی‌های نرم افزار Procheck (که نمودار رامچاندرا را نیز در بر می‌گیرد) صورت گرفت. در نهایت دو مدل به عنوان بهترین مدل‌ها بر اساس الگوی باکتریایی (Mdl-1) و الگوی بی‌مهره (Mdl-2) انتخاب شدند.

هم ترازوی سه بعدی ساختارها: در ادامه هم ترازوی سه بعدی ساختار دارای لیگاند سیتالو پرام (5i71) و هم چنین مدل‌ها (Mdl-1, Mdl-2) با ساختار اصلی 5-HTT بدون لیگاند (5i6z) به عنوان ساختار مرجع، توسط نرم افزار Swiss pdb viewer نسخه 4.1 انجام شد (۱۶). RMSD هم ترازوی کربن‌های آلفای ساختارها نیز در همین نرم افزار محاسبه شد.

نمودار هیدروپاتی: نمودار هیدروپاتی اسیدهای آمینه‌ی 5-HTT، توسط ابزار شناسایی و آنالیز پروتئین ProtScale در ExPASy به دست آمد (۱۷). مقادیر محاسبه شده برای ۶۱۷ اسید آمینه‌ی پروتئین هدف (5i6z)، بر اساس شاخص کایت و دولیتل محاسبه شد که در میان شاخص‌های موجود از پر کاربردترین موارد در حوزه تعیین دامنه‌های غشایی پروتئین‌ها است. بنا بر رویه‌ی استاندارد نرم افزار در بررسی توالی، دو پنجره‌ی ۱۳ و ۱۹ تایی به طور جداگانه و در دو نوبت در ابزار ProtScale انتخاب شدند تا میزان آب‌گریزی رزیدوها محاسبه شود. در این روش ابتدا بازه‌ی ۱۳ تایی از اسیدهای آمینه از رزیدوی اول تا سیزدهم انتخاب شد. سپس میزان آب‌گریزی برای رزیدوهای کل این بازه محاسبه و به رزیدوی میانی بازه‌ی ۱۳ تایی (رزیدوی

در مجموع ۶۸/۵٪ اسیدهای آمینه پروتئین، یعنی ۳۷۳ از تعداد کل ۵۴۴ اسید آمینه، بالای خط سیاه رنگ قرار گرفته و آب گریز به حساب آمده‌اند.

با استفاده از دو پنجره‌ی ۱۳ و ۱۹ تایی صورت گرفته است که پیشتر در بخش روش‌ها درباره‌ی آن توضیح داده شد. رزیدوهای آمینو اسیدی قرار گرفته در بالای خط آستانه‌ی سیاه رنگ در شکل ۱، آب گریز هستند.

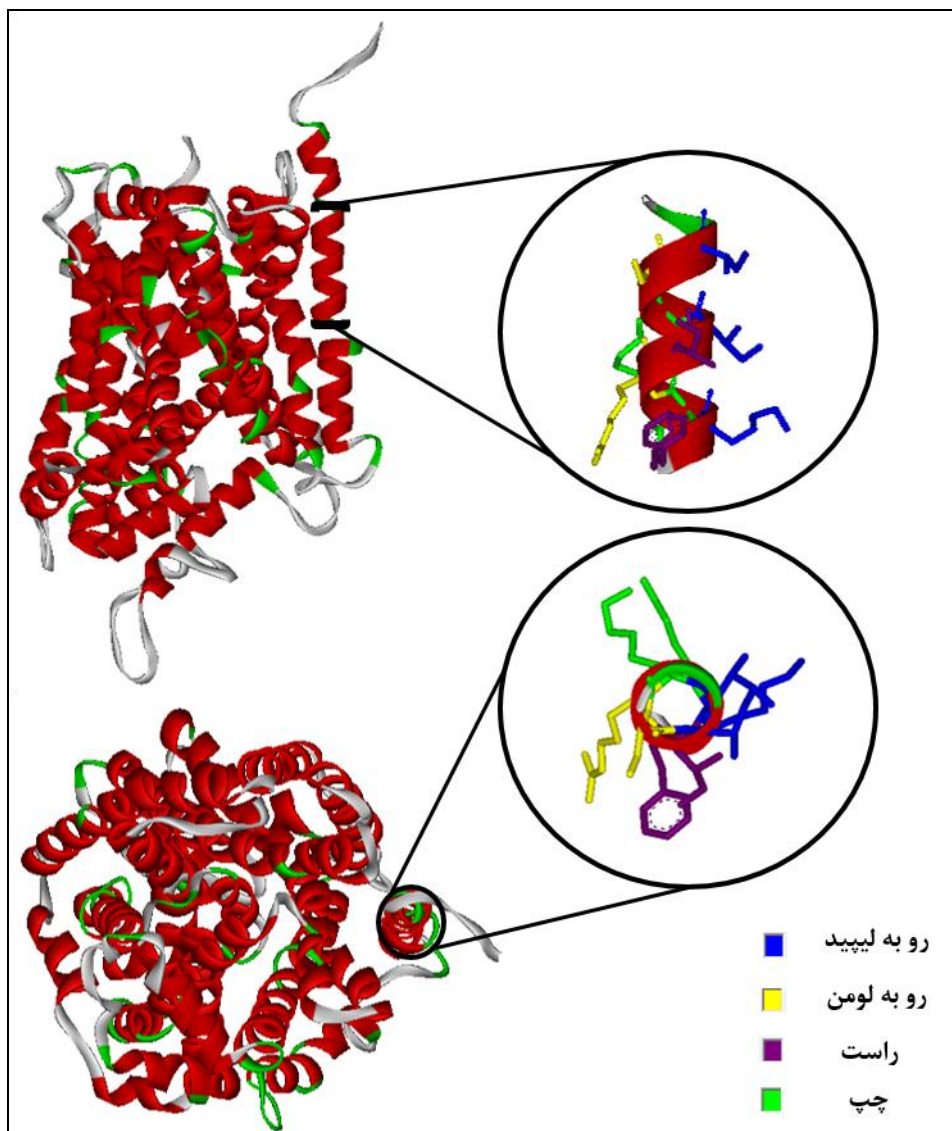


شکل ۱. پروفایل هیدروپاتی برای پروتئین 5-HTT (5i6z). منحنی آبی رنگ حاصل بررسی رزیدوها با پنجره‌ی ۱۳ تایی و منحنی قرمز رنگ حاصل بررسی با پنجره‌ی ۱۹ تایی هستند.

هیدروپاتی کایت و دولیتل، به ترتیب از چپ به راست منظم شده‌اند. فراوانی نسبی این رزیدوها در ۲۳۳ اسید آمینه‌ی انتخاب شده از ساختار اصلی نیز به این صورت است: ایزولوسین (۰/۱۳)، والین (۰/۱۱)، لوسین (۰/۱۴)، فنیل آلانین (۰/۱)، سیستئین (۰/۰۲)، متیونین (۰/۰۲)، آلانین (۰/۱)، گلايسين (۰/۰۶)، ترئونین (۰/۰۷)، سرین (۰/۰۶)، تریپتوفان (۰/۰۲)، تیروزین (۰/۰۳)، پرولین (۰/۰۲)، هیستیدین (۰)، گلوتامیک اسید (۰/۰۱)، گلوتامین (۰/۰۱)، آسپارتیک اسید (۰/۰۲)، آسپارژین (۰/۰۱)، لایزین (۰/۰۱) و آرژنین (۰/۰۱). در میان اسیدهای آمینه رو به لیپید به ترتیب ایزو لوسین، لوسین، والین، ترئونین، آلانین و فنیل آلانین فراوانی بیش تری داشتند. بنا بر این می‌توان گفت الگوهای سه بعدی جایگیری این رزیدوها تعیین کننده‌ی بیشتر بر هم کنش‌های پروتئین با غشا لیپیدی و عملکرد ناشی از این برهمکنش‌ها است. در دسته‌ی سمت راست این اسیدهای آمینه میزان ایزو لوسین، والین و آلانین و در دسته‌ی سمت چپ میزان لوسین، آلانین و فنیل آلانین از سایرین بیشتر بود. در دسته‌ی رو به لومن نیز گلايسين، ایزو لوسین و سرین بیش ترین فراوانی را داشتند. از میان ۳ اسید آمینه‌ی حجیم (آروماتیک) در دسته‌ی رو به لیپید، فقط فنیل آلانین فراوانی چشم گیری داشت.

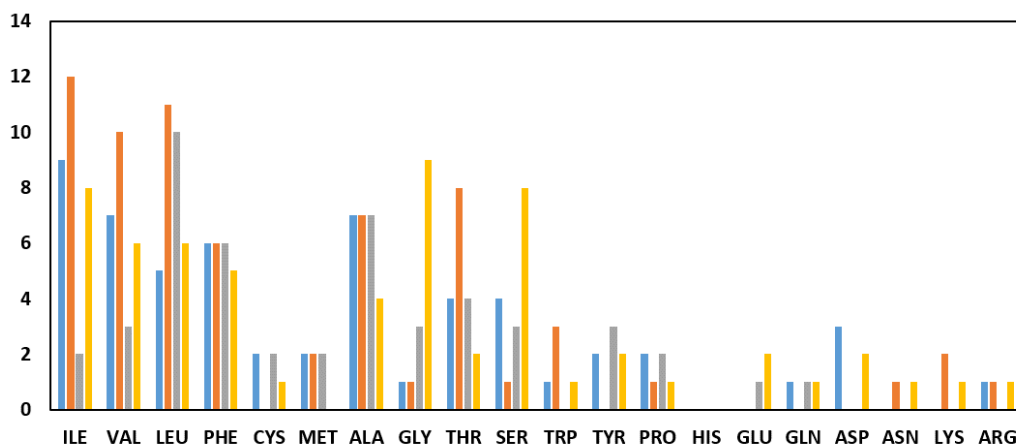
آنالیز رزیدوهای هلیکس‌های غشایی 5-HTT: در مرحله بعدی، تمام رزیدوهای رو به لیپید ساختار پروتئین 5-HTT که در ارتباط با غشا هستند، با دقت مشخص و آنالیز شدند. با در نظر گرفتن "i" به عنوان اسید آمینه‌ای با زنجیره‌ی جانبی رو به لیپید (که در تماس با لیپیدهای غشایی هستند)، اسیدهای آمینه‌ی $i+1$ ، $i+2$ و $i+3$ به ترتیب راست، رو به لومن و چپ نامیده شدند (شکل ۲). به دلیل آن که در هر دور از هلیکس‌ها به طور متوسط ۳/۶ رزیدو قرار می‌گرفت، علاوه بر استفاده از فرمول بالا به جهت گیری تک تک رزیدوها نیز توجه شد. در آنالیز ساختار اصلی حاصل از کریستالو گرافی (5i6z) برای بررسی دقیق تر، از ۳۷۳ اسید آمینه‌ی انتخاب شده در مرحله‌ی قبل تعدادی کنار گذاشته شدند و در نهایت ۲۳۳ رزیدو باقی ماندند. این اسیدهای آمینه‌ی حذف شده یا در نواحی هلیکس‌های غشایی حضور نداشتند و یا در دو انتهای هلیکس‌ها جای گرفته بودند. به عبارت دیگر این رزیدوها در هیچ کدام از موقعیت‌های $i+1$ ، $i+2$ و $i+3$ قرار نمی‌گرفتند. به این ترتیب کل ۲۳۳ رزیدوی غشایی انتخاب شده به ۴ دسته‌ی رو به لیپید، راست، رو به لومن و چپ تقسیم شدند.

میزان فراوانی ۲۰ اسید آمینه‌ی طبیعی در میان این ۴ دسته در شکل ۳ قابل مشاهده است. در این نمودار، اسیدهای آمینه بر اساس افزایش عدد شاخص



شکل ۲. نحوه‌ی دسته‌بندی رزیدوهای ساختار پروتئین 5-HTT. ۴ دسته رزیدوی بررسی شده با رنگ‌های آبی (رو به لیپید)، زرد (رو به لومن)، بنفش (راست) و سبز (چپ) در شکل مشخص شده‌اند. در بالا تصویر پروتئین از پهلو و در پایین تصویر پروتئین از بالا، جهت کمک به درک بهتر نحوه‌ی بررسی آورده شده‌اند.

رو به لومن چپ رو به لیپید راست

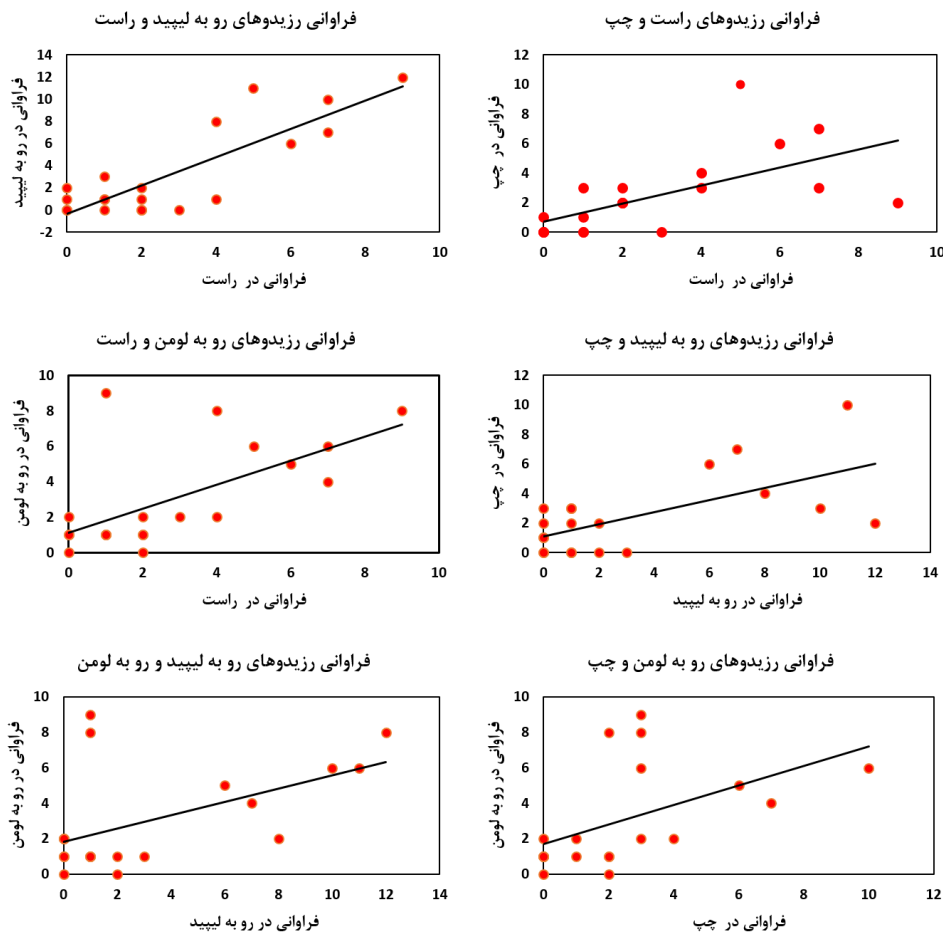


شکل ۳. نمودار فراوانی انواع اسیدهای آمینه در میان رزیدوهای رو به لیپید، راست، چپ و رو به لومن از ساختار کریستالوگرافی پروتئین 5-HTT (5i6z).

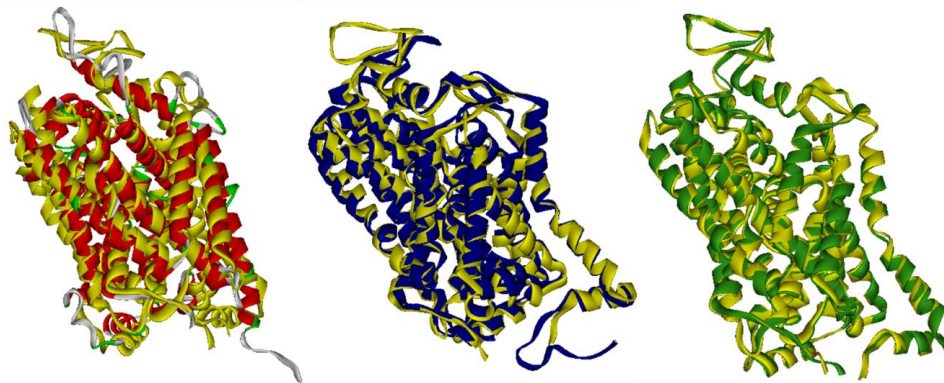
گرفت. یکی از این ساختارها، پروتئین دارای لیگاند اس-سیتالو پرام در پاکت اتصال مرکزی (5i71) است که رزیدوهای ۴۷ تا ۶۱۵ آن در ساختار کریستالو گرافی هستند و دیگری، ساختار اصلی پروتئین بدون لیگاند (5i6z) است که رزیدوهای ۴۷ تا ۶۱۷ آن کریستالو گرافی شده است. هم چنین برای بررسی دقیق تر، دو مدل سه بعدی از 5-HTT نیز به روش همولوژی و با استفاده از الگوهای باکتریایی (LeuTaa) و بی مهره (dDAT) ساخته شد. نتایج هم ترازوی های سه بعدی میان ساختارها (شکل ۵) نشان داد میزان RMSD هم ترازوی کربن های آلفای ساختار مرجع با ساختارهای Mdl-1، Mdl-2 و ساختار 5i71 به ترتیب ۸/۶، ۲/۶ و ۰/۵۱ است. بنا بر این 5-HTT دارای لیگاند سیتالو پرام (5i71) بیش ترین انطباق را با ساختار مرجع (5i6z) دارد و مدل های دو (Mdl-2) و یک (Mdl-1) نیز در رتبه های بعدی میزان شباهت قرار می گیرند.

جدول ۱، ضرایب همبستگی میان دسته های متناظر اسید آمینه در ساختارهای ذکر شده را نشان می دهد. بر اساس جدول، بیشترین میزان همبستگی میان دسته های اسید آمینه در ساختارهای 5i6z و 5i71 دیده شد که این مسئله با توجه به RMSD اندک میان دو ساختار (۰/۵۱) تایید می شود. در مورد ساختارهای مدل Mdl-1 و Mdl-2، اختلاف در درصد شباهت الگوها منجر به تغییر ضرایب همبستگی شد، به گونه ای که افزایش ۲۲ درصدی شباهت از الگوی باکتریایی به الگوی بی مهره، منجر شد میانگین ضرایب همبستگی از ۰/۷۴ برای Mdl-1، به ۰/۸۷ برای Mdl-2 بهبود پیدا کند. هم چنین مقایسه ی مقادیر RMSD ذکر شده در بالا نشان می دهد اختلاف ۲۲ درصدی در میزان شباهت دو الگوی مدل سازی با توالی 5-HTT، می تواند منجر به اختلافی ۶ آنگسترومی در RMSD مدل ساخته شده با ساختار حاصل از کریستالو گرافی این پروتئین شود که مقداری قابل توجه است.

همبستگی دسته های چهارگانه ی انتخابی در هلیکس های غشایی 5-HTT: در میان ۴ دسته ی به دست آمده، برخی اسیدهای آمینه فراوانی های نسبی مشابهی داشتند. به عنوان مثال بیشتر رزیدوها در دسته های رو به لیپید و راست فراوانی های نسبی مشابهی داشتند و روند تغییرات فراوانی نسبی در این دو دسته به یکدیگر شباهت داشت. دسته هایی که اسیدهای آمینه در آن ها فراوانی های نسبی مشابهی داشتند، همبستگی بالایی با یکدیگر نشان می دهند: چنان که ضریب همبستگی فراوانی نسبی رزیدوهای مختلف در دسته های رو به لیپید و راست ۰/۸۴ به دست آمد. هم چنین فراوانی نسبی اسیدهای آمینه ی دسته های راست و رو به لومن همبستگی بسیاری (۰/۶۳) با یکدیگر دارد؛ در حالی که به دلیل تفاوت های زیاد و عدم تقارن میان اسیدهای آمینه ی چپ و رو به لومن، کم ترین میزان همبستگی (۰/۵) دیده می شود. ضرایب همبستگی فراوانی نسبی رزیدوها میان دسته های دیگر نیز عبارت است از ۰/۶۱ برای دسته های راست و چپ، ۰/۶۳ برای دسته های چپ و رو به لیپید، ۰/۵۳ برای دسته های رو به لیپید و رو به لومن. نمودار پراکندگی فراوانی انواع اسیدهای آمینه در میان ۴ دسته ی انتخابی در شکل ۴ دیده می شود. همبستگی بالا میان دسته رو به لیپید و راست احتمالاً می تواند نشان از چرخش هلیکس ها در تغییر کنفورماسیونی پروتئین 5-HTT باشد. به گونه ای که در اثر تبدیل کنفورماسیون رو به درون سلول به حالت رو به بیرون سلول برای این پروتئین، جایگاه رزیدوهای رو به لیپید و دسته راست تا حدودی با هم عوض می شود. مقایسه ی ساختارهای کریستالو گرافی و مدل های پروتئین 5-HTT در مطالعه ی حاضر، از میان ۶ ساختار به دست آمده از پروتئین 5-HTT به روش کریستالو گرافی که در سال ۲۰۱۶ در قالب مقاله ای در مجله ی Nature ارائه شده (۵)، دو ساختار مورد استفاده قرار



شکل ۴. نمودار پراکنندگی فراوانی نسبی انواع اسیدهای آمینه‌ی پروتئین 5-HTT (5i6z) در میان ۴ دسته‌ی انتخابی.



شکل ۵. به ترتیب از چپ به راست: نتایج هم‌ترازی سه بعدی ساختارهای Mdl-1 (قرمز)، Mdl-2 (آبی) و 5i71 (سبز) با ساختار مرجع (5i6z) (زرد).

جدول ۱. مقایسه‌ی ضرایب همبستگی میان دسته‌های اسید آمینه‌ی ساختارهای Mdl-1، Mdl-2 و 5i71 با ساختار مرجع (5i6z).

نام دسته / نام ساختار	MDL-1	MDL-2	5I71
رو به لیپید - رو به لیپید	+ / ۸۷	+ / ۹۳	۱ / ۰۰
راست - راست	+ / ۶۸	+ / ۸۱	۱ / ۰۰
رو به لومن - رو به لومن	+ / ۶۲	+ / ۹۱	۱ / ۰۰
چپ - چپ	+ / ۸	+ / ۸۲	۱ / ۰۰

بحث و نتیجه گیری

علی رغم اهمیت بالای پروتئین 5-HTT در تحقیقات طراحی دارو، میزان اطلاعات در سطح رزیدو (residue-level information) درباره‌ی این پروتئین در مطالعاتی که تا کنون انجام شده است قابل توجه نیست. تعداد مطالعاتی که در سطح مولکولی به بررسی برهم کنش انتقال دهنده‌های غشایی و غشای لیپیدی پرداختند نیز اندک است (۱۹). با توجه به این که تعیین ساختار پروتئین 5-HTT به روش کریستالوگرافی اشعه ایکس اخیراً انجام شده است، می‌توان گفت استفاده از ساختاری سه بعدی به این صورت و برای بررسی ترکیب اسیدهای آمینه‌ی این پروتئین تاکنون انجام نگرفته است. مطالعه‌ی پروتئین‌های غشایی در سطح رزیدو، اغلب با استفاده از تعداد کم و یا حتی یک ساختار حاصل از کریستالوگرافی به انجام رسیده است (۱۹) که این مسئله به دلیل وجود تعداد اندک ساختارهایی از انتقال دهنده‌های غشایی است که از روش‌های تجربی به دست آمده باشند. به عنوان مثال در سال ۲۰۰۴، ترکیب اسیدهای آمینه‌ی تعدادی از انتقال دهنده‌های غشایی با استفاده از ۴ ساختار به دست آمده به روش کریستالوگرافی اشعه ایکس تعیین شده است (۸). البته در این مقاله یا مطالعات دیگر دسته بندی رزیدوهای مربوط به هلیکس‌های غشایی بررسی نشده است. در پژوهش حاضر تنها به بررسی ساده‌ی ترکیب رزیدوها پرداخته نشده، بلکه با استفاده از روش جدید دسته بندی رزیدوهای هلیکس‌های غشایی، آنالیزهای مختلفی نیز صورت گرفته است. ما در ابتدا از ساختار حاصل از کریستالوگرافی پروتئین 5-HTT (5i6z) برای بررسی ترکیب و جهت گیری زنجیره‌های جانبی رزیدوهای انتقال دهنده‌ی سروتونین انسانی استفاده شد. در ادامه نیز مقایسه‌ی میان این رزیدوها با رزیدوهای ساختارهای دارای لیگاند سیتالوپرام (5i71) و مدل‌های ساخته شده از پروتئین بر اساس الگوهای همولوگ‌های باکتریایی (Mdi-1) و بی مهره (Mdi-2) را انجام داده ایم.

روش جدید استفاده شده، شامل دسته بندی اسیدهای آمینه‌ی یک پروتئین غشایی به ۴ دسته بر

اساس موقعیت زنجیره‌های جانبی آن‌ها در ارتباط با غشا است. این گونه بررسی و تقسیم بندی، برای نخستین بار است که در مطالعات صورت گرفته بر روی ترکیب اسیدهای آمینه‌ی پروتئین‌ها انجام می‌گیرد. از نزدیک ترین روش‌های بررسی به این روش، می‌توان به نحوه‌ی مطالعه‌ی بخشی از سیستم جا به جایی دوتایی آرژنین در کلروپلاست (cpTat) اشاره کرد که یک جزء پروتئینی آن به نام Hcf106 دارای هلیکسی آمفی پاتیک است (۶). در این بررسی با استفاده از روشی متفاوت با روش مطالعه‌ی حاضر، ابتدا این هلیکس از نظر داشتن دو نیم-هلیکس آب‌دوست و آب‌گریز بررسی شده و سپس ترکیب رزیدوهای هر نیم هلیکس در قالب ۳ دسته مشخص شده است. این ۳ دسته شامل رزیدوهای آب‌گریز، آب دوست باردار و آب دوست بدون بار هستند. در بررسی دیگری، پراکنش اسیدهای آمینه‌ی ۱۵ پروتئین غشایی که مجموعاً دارای ۱۲۹ هلیکس هستند مورد مطالعه قرار گرفته است (۷). دو روش استفاده شده برای بررسی پراکنش رزیدوها در این مطالعه، شامل بررسی بر مبنای توالی اسیدهای آمینه‌ی این ساختارها و بررسی بر اساس مختصات کربن‌های آلفا نسبت به مرکز غشای لیپیدی است. هر دو مطالعه‌ی فوق نوعی از تقسیم بندی را برای اسیدهای آمینه‌ی هلیکس‌های مورد نظر (در اولی یک هلیکس آمفی پاتیک از پروتئین Hcf106 و در دومی ۱۲۹ هلیکس غشایی از ۱۵ پروتئین) ارائه کرده اند. با این حال در مطالعات ذکر شده، توجه به جهت گیری رزیدوها نسبت به لیپیدهای غشایی ملاک دسته بندی نبوده است. به دلیل اهمیت بالای انتقال دهنده‌های غشایی مانند 5-HTT و برهم کنش این پروتئین‌ها با غشا، پژوهش حاضر به طور اختصاصی ساختار پروتئینی را از این جنبه‌ی پایه‌ای مورد بررسی قرار داده است. مطالعه‌ی داده‌های حاصل از این روش بررسی رزیدوها، اطلاعات جدیدی در مورد ساختار و عملکرد پروتئین غشایی 5-HTT پیشنهاد می‌دهد.

قسمت عمده‌ی ترکیب اسیدهای آمینه‌ی هلیکس‌های غشایی در 5-HTT به رزیدوهای آب‌گریز تعلق دارد که نقشی اثر گذار در تشکیل هلیکس دارند (۲۰). علت این فراوانی هم چنین قابلیت برهم

کنش زنجیره‌های جانبی آن‌ها با لیپیدهای غشایی است. براساس داده‌های ذکر شده در بخش نتایج، ترکیب اسیدهای آمینه‌ی ۱۲ هلیکس‌های غشایی 5-HTT نشان دهنده‌ی حضور ۶۲ درصدی رزیدوهای آب‌گریز در این نواحی است. این در حالی است که میانگین این میزان در هلیکس‌های غشایی گیت‌های غشایی (سایر ترانسپورترها و کانال‌های یونی) به ۶۸/۵٪ می‌رسد (۸). این داده‌ها نشان دهنده‌ی کم‌تر بودن میزان آب‌گریزی بخش غشایی 5-HTT از حد میانگین پروتئین‌های سراسر غشایی است. بنا بر این می‌توان نتیجه گرفت که بر هم کنش‌های هیدروفوب این پروتئین با لیپیدهای غشایی، از حد میانگین بر هم کنش پروتئین‌های غشایی کم‌تر است. علی‌رغم نزدیک بودن مقادیر شاخص هیدروپاتی در میان سه اسید آمینه‌ی آب‌گریزی که بیش‌ترین فراوانی را در بخش غشایی 5-HTT دارند، لوسین و ایزو لوسین فراوانی بیشتری نسبت به والین دارند. طول بیشتر زنجیره‌های جانبی لوسین و ایزو لوسین نسبت به والین احتمالاً باعث این فراوانی بیش‌تر است. با توجه به این که فضای نمونه در این مطالعه متشکل از رزیدوهای هلیکس‌ها است، تعدد رزیدوهای هلیکس‌ساز لوسین که در بخش‌های ساختاری مرتبط با غشا دیده می‌شود امری عادی است (۲۱). نکته دیگر این که میانگین فراوانی رزیدوهای آروماتیک در نواحی هلیکسی گیت‌های غشایی (به جز انتقال دهنده‌ی سروتونین انسانی) ۸٪ است (۸)، در حالی که مطالعه حاضر نشان می‌دهد این میزان در 5-HTT به حدود ۱۵٪ افزایش می‌یابد. یکی از فراوان‌ترین اسیدهای آمینه در ساختار پروتئین 5-HTT رزیدوی آروماتیک فنیل آلانین است که بالا‌ترین فراوانی را در میان رزیدوهای آروماتیک پروتئین نیز دارا است. از میان رزیدوهای آروماتیک پس از فنیل آلانین، تیروزین و تریپتوفان به ترتیب از بالا‌ترین فراوانی برخوردارند. لازم به ذکر است علت کم‌تر بودن فراوانی تیروزین نسبت به فنیل آلانین ممکن است گروه هیدروکسیل موجود در اسید آمینه‌ی تیروزین باشد که تنها تفاوت میان ساختار زنجیره‌ی جانبی در این دو اسید آمینه است. عدم وجود تیروزین در دسته رو به لیپید نیز در این جا جالب توجه است.

زنجیره‌ی جانبی آن دسته از رزیدوها که "رو به لیپید" نام‌گذاری شده‌اند، در میان لیپیدهای غشایی قرار می‌گیرد. داده‌های حاصل از این مطالعه نشان می‌دهند بیش‌ترین تعداد اسیدهای آمینه‌ی آب‌گریز (۷۲٪) در دسته‌ی رو به لیپید جای دارند و دسته‌های راست، چپ و رو به لومن نیز به ترتیب با ۶۶/۶۵ و ۴۹ درصد از رزیدوهای آب‌گریز در جایگاه‌های بعدی قرار دارند. ایزو لوسین و لوسین دارای بلندترین زنجیره‌ی جانبی در میان اسیدهای آمینه‌ی آب‌گریز می‌باشند و در عین حال هیدروفوب‌ترین رزیدوهای به کار رفته در ساختار انتقال دهنده‌ی سروتونین هستند. با توجه به وظیفه‌ی رزیدوهای دسته‌ی رو به لیپید در بر هم کنش با لیپیدهای غشایی، مشاهده‌ی بیش‌ترین حضور مربوط به این دو اسید آمینه در این دسته، خارج از انتظار نبوده است. علاوه بر این، مطالعات جهش‌زایی نشان می‌دهد تغییر در رزیدوهای Ile425 و Leu550 که در همین دسته قرار می‌گیرند، میزان فعالیت انتقال سروتونین و پایداری انتقال دهنده را تغییر می‌دهد (۵). این مسئله نقش مهم رزیدوها در دسته‌ی رو به لیپید را نشان می‌دهد. پس از لوسین و ایزو لوسین، والین نیز با داشتن زنجیره‌ی جانبی کوتاه‌تر (در میان رزیدوهای هیدروفوب آلفاتیک) در درجه‌ی بعدی فراوانی قرار می‌گیرد. از سایر گروه‌های اسید آمینه‌ای که فراوانی قابل توجهی در دسته‌ی رو به لیپید دارند می‌توان به رزیدوهای آروماتیک اشاره کرد. فنیل آلانین و تریپتوفان موجود در دسته‌ی اسیدهای آمینه‌ی رو به لیپید، رزیدوهای آروماتیکی هستند که در ارتباط مستقیم با لیپیدهای غشایی قرار دارند (این در حالی است که فراوانی تیروزین در این دسته صفر است). آن چه به عنوان نقش اصلی این رزیدوها مشخص شده، کمک به اتصال و جهت‌گیری پروتئین‌ها در غشای لیپیدی است (۲۲، ۱۹). رزیدوهایی که فراوانی آن‌ها در دسته‌ی رو به لیپید صفر است، علاوه بر تیروزین شامل گلوتامین و رزیدوهای دارای بار الکتریکی منفی مانند آسپارتیک اسید و گلوتامیک اسید اند. انتظار می‌رود فراوانی رزیدوهای دارای بار الکتریکی مثبت مانند لایزین و آرژنین در دسته‌ی رو به لیپید که با لیپیدهای غشایی در تماس هستند، صفر باشد. اما مجموع فراوانی

۲۶)، با این حال پیشنهاد چرخش هلیکس ها در این مطالعه می‌تواند راه گشای مطالعه‌ی بیشتر در این مورد و به طور کلی در مورد نحوه‌ی عملکرد این انتقال دهنده‌ی غشایی باشد.

رزیدوهایی که رو به لومن پروتئینی هستند و زنجیره‌ی جانبی آن‌ها پشت رزیدوهای رو به غشا قرار گرفته، با نام دسته‌ی "رو به لومن" شناسایی و معرفی شده‌اند. همان طور که مشخص است، مولکول‌های آب دائما در حال عبور از لومن پروتئین هستند و بنابراین رزیدوهای آب دوست، بیشتر ترکیب رزیدوهای رو به لومن را تشکیل داده اند. نتایج ذکر شده در بخش یافته‌ها هم چنین تایید می‌کند که علی رغم وجود کمترین تعداد اسیدهای آمینه‌ی آب گریز در دسته‌ی رو به لومن (در میان ۴ دسته)، درصد رزیدوهای آب گریز در این دسته هم چنان بالاست. انتقال دهنده‌های غشایی ساختاری متفاوت با کانال‌ها دارند و در مورد 5-HTT، فضای میانی انتقال دهنده محل عبور سروتونین و یون سدیم است. ساختار سروتونین با داشتن حلقه‌ی بنزی، دارای بخش آب گریز است و یون سدیم نیز تمایل به برقراری بر هم کنش الکترو استاتیک با بخش‌های دارای بار منفی دارد. بر هم کنش‌های سروتونین در این جا می‌تواند توجیهی برای حضور اسیدهای آمینه‌ی آب گریز در دسته‌ی رو به لومن باشد. یکی از نکات قابل توجه، نوع و درصد حضور رزیدو ها در این دسته است. بیشترین فراوانی اسیدهای آمینه در دسته‌ی رو به لومن به ترتیب مربوط به گلايسين (۱۵٪)، سرین و ایزو لوسین (۱۳٪) و کمترین فراوانی مربوط به متیونین و هیستیدین (۰٪) است. البته هیستیدین در هر چهار گروه فراوانی صفر دارد. بنا بر این چنان که قابل مشاهده است، فراوانی اسیدهای آمینه‌ی کوچک در دسته‌ی رو به لومن از سایر اسیدهای آمینه بیشتر است. می‌توان گفت که فراوانی بالای اسیدهای آمینه‌ی کوچک در این دسته، احتمالا به دلیل لزوم شکل‌گیری فضای خالی لومن جهت عبور سروتونین و یون است. لازم به ذکر است که کمترین میزان همبستگی میان چهار دسته مربوط به دسته‌های رو به لومن و رو به لیپید، و نیز رو به لومن و چپ می‌باشد. در این دو دسته‌ای که کمترین

لایزین و آرژنین در این دسته حدود ۵٪ است. این رزیدو ها در دو ناحیه‌ی "کمربندی" در نیمه‌های بالایی و پایینی بخش غشایی 5-HTT حضور پیدا می‌کنند، لذا به نظر می‌رسد وظیفه‌ی یک رزیدوی آرژنین و دو رزیدوی لایزین (در ناحیه کمربند داخلی) برهمکنش با سرهای باردار لیپیدهای غشایی است.

انتظار می‌رود رزیدوهای دسته‌های راست و چپ بیشتر در برهم کنش‌های هلیکس-هلیکس شرکت داشته باشند. این برهم کنش‌ها نقشی مهم در حفظ ساختار سوم پروتئین‌های غشایی دارند (۲۳، ۲۴). در واقع، این برهم کنش‌های پهلوی به پهلوی هلیکس‌ها در غشای لیپیدی است که منجر به شکل‌گیری ساختار تا خورده‌ی نهایی شده، و بهترین حالت برای مجاورت هلیکس‌ها با هم و تشکیل صحیح ساختار سوم را به دست می‌دهد (۲۵). در این میان، رزیدوی آب گریز و کوچک آلانین با داشتن زنجیره‌ی جانبی کوتاه، نقش مهمی در این برهم کنش‌ها ایفا می‌کند (۷). داده‌های حاصل از بررسی ساختار در این مطالعه نشان می‌دهند این اسید آمینه در دسته‌های راست و چپ به مقدار زیادی حضور دارد و مقدار آن در هر دو دسته برابر است (شکل ۳) که این مشاهده با یافته‌های قبلی هم خوانی دارد (۷). رزیدوی لوسین در دسته چپ بیشترین فراوانی را دارد. لوسین در برهم کنش‌های هلیکس-هلیکس در ساختارهای موتیفی معروفی مانند زیپ لوسینی نقش دارد. لذا می‌توان انتظار داشت که این اسید آمینه در پروتئین 5-HTT در برهم کنش‌های هلیکس-هلیکس نقش داشته باشد.

یکی از نتایج بسیار جالب در این کار، وجود ضریب همبستگی ۸۴ درصدی میان دسته‌های راست و رو به لیپید است. چنین ضریب همبستگی بالایی، این احتمال را مطرح می‌کند که هلیکس‌های غشایی در جریان تغییر کنفورماسیونی ناشی از باز و بسته شدن کانال انتقال دهنده دچار چرخش می‌شوند. این چرخش به گونه‌ای است که جایگاه رزیدوهای رو به لیپید و راست را، حداقل در بعضی از هلیکس‌ها با یکدیگر جا به جا می‌کند. البته در سایر بررسی‌های مکانیکی صورت گرفته بر روی مکانیزم عملکرد انتقال دهنده‌های غشایی تا کنون چنین فرضیه‌ای مطرح نشده است (۲۷).

با میانگین همین ضرایب برای مدل دوم (Mdl-2) ۱۳٪ کم تر است. میزان این اختلاف در ضرایب همبستگی میان دسته‌های رو به لومن دو مدل با ساختار مرجع به بیش‌ترین مقدار (۲۹٪) می‌رسد. ضرایب همبستگی میان ساختارهای مرجع و Mdl-2 نشان دهنده‌ی ضریب همبستگی ۰/۹۳ رزیدوها در دسته‌ی رو به لیپید، ۰/۹۱ در رو به لومن، ۰/۸۲ در چپ و ۰/۸۱ در دسته‌ی راست است. در حالی که مقادیر متناظر این ضرایب در Mdl-1 به ترتیب ۰/۸۷، ۰/۶۲، ۰/۸۰ و ۰/۶۸ است. اهمیت این تفاوت زمانی معلوم می‌شود که بدانیم ضریب همبستگی در دو ساختار کریستالو گرافی دارای لیگاند و بدون لیگاند سیتالو پرام (در پاکت اتصال مرکزی) کاملاً برابر است. آن چه می‌توان نتیجه گرفت این است که با تغییر الگوی مورد استفاده در ساخت مدل، اسیدهای آمینه‌ی دسته‌های ۴ گانه دستخوش تغییرات جدی می‌شوند که منجر به تغییر ترکیب رزیدوهای این دسته‌ها می‌شود. این بدین معنی است که رزیدوهای هرکدام از این دسته‌ها ممکن است در موقعیت‌های دیگر مکانی و در نتیجه در یکی دیگر از دسته‌ها قرار بگیرند؛ مساله‌ای که به معنی تغییری اساسی در این مدل‌ها است. بررسی ضرایب همبستگی تک تک دسته‌های اسید آمینه‌ای مدل ضعیف‌تر (Mdl-1) و مدل بهتر (Mdl-2) با ساختار مرجع، جا به جایی مکانی رزیدوها با تغییر الگو را در همه‌ی دسته‌ها نشان می‌دهد. این استفاده از ضرایب همبستگی در بررسی میزان صحت مدل‌ها، در مطالعات پیشین ارزیابی مدل سازی همولوژی مورد استفاده قرار نگرفته است (۲۸-۳۰). در مطالعات پیشین سنجش میزان صحت مدل، عموماً از روش‌های معمول نظیر بررسی RMSD میان کربن‌های آلفای مدل‌ها و ساختار مرجع در حالت هم ترازوی سه بعدی (superimposed) استفاده شده است.

با توجه به این یافته‌ها همچنین می‌توان نتیجه گرفت در مدل‌سازی پروتئین‌های غشایی نظیر ترانسپورترها که ساختاری مشابه 5-HTT دارند، استفاده از الگویی با همسانی کمتر از ۳۰٪ نتایج غیر قابل قبولی ارائه داده و مدل را تقریباً غیر قابل استفاده می‌کند. این نتیجه، یافته‌های قبلی (یعنی استفاده از

همبستگی را با دسته‌ی رو به لومن دارند، کم‌ترین فراوانی رزیدوهای کوچک دیده می‌شود. بر اساس ساختار حاصل از کریستالو گرافی پروتئین 5-HTT (5i6z)، جهت گیری زنجیره‌ی جانبی رزیدوهای قرار گرفته در این دسته بیشتر به سمت لومن پروتئینی است. با توجه به این جهت گیری و البته ساختار کوکریستال 5-HTT که به همراه سیتالو پرام در جایگاه اتصال مرکزی به دست آمده است، می‌توان گفت رزیدوهایی از فضای کانالی که در جا به جایی و اتصال لیگندهایی نظیر داروهای ضد افسردگی به این پروتئین نقش دارند، در این دسته قرار می‌گیرند. بر اساس یافته‌های قبلی، تعدادی از اسیدهای آمینه‌ی موثر در اتصال داروی ضد افسردگی اس- سیتالو پرام به پاکت مرکزی 5-HTT شامل Tyr95، Ala169، Ile172 و Ser438 هستند (۵). مقایسه‌ی نتایج به دست آمده از ساختار کوکریستال و نتایج به دست آمده در این مطالعه نشان می‌دهد تمامی این رزیدوها در دسته‌ی رو به لومن قرار می‌گیرند. بنا بر این نکته نیز تایید کننده‌ی نقش رزیدوهای دسته‌ی رو به لومن در بر هم کنش با لیگاند است.

در این مطالعه مقایسه‌ی دسته‌های چهارگانه‌ی دو مدل ساخته شده به روش همولوژی (Mdl-1 و Mdl-2) و دو ساختار کریستالو گرافی (5i6z و 5i71)، روشی جدید برای سنجش میزان صحت مدل سازی همولوژی در مدل کردن هلیکس‌های غشایی یک پروتئین انتقال دهنده ارائه می‌دهد. در ساخت مدل اول، الگویی باکتریایی با شباهت ۳۸ و یکسانی (identity) ۲۲ درصد مورد استفاده قرار گرفت. در ساخت مدل دوم نیز از الگوی انتقال دهنده‌ی دوپامین *Drosophila melanogaster* با شباهت ۶۰ و یکسانی ۴۴ درصد استفاده شد. تفاوت ۲۲ درصدی میزان شباهت توالی‌های الگو با توالی پروتئین هدف (5-HTT)، در ساخت مدل‌های سه بعدی، منجر به ایجاد تفاوت‌های چشم گیری در میزان فراوانی اسیدهای آمینه شده است که توسط ضرایب همبستگی میان ۴ دسته‌ی آمینو اسیدی تایید می‌شود. بر اساس داده‌های بخش نتایج، میانگین ضرایب همبستگی میان دسته‌های ۴ گانه‌ی ساختار مرجع (5i6z) و مدل اول (Mdl-1) در مقایسه

هلیکس‌ها با ۷۲٪، مربوط به دسته‌ی رو به لیپید است. این در حالی است که در دسته‌های راست، چپ و رو به لومن سهم رزیدوهای آب دوست بیشتر بوده و به ویژه در دسته‌ی رو به لومن به ۴۹٪ می‌رسد. ترکیب اسید آمینه‌ای دسته‌های رو به لیپید و راست بیشترین شباهت را با یکدیگر دارد و کم‌ترین شباهت در ترکیب اسیدهای آمینه نیز میان دسته‌های چپ و رو به لومن دیده می‌شود. استفاده از بررسی‌هایی نظیر آن چه در این مطالعه صورت گرفته است، شناخت بهتری از نحوه‌ی ارتباط با غشا و عملکرد پروتئین 5-HTT و به واسطه آن، عملکرد خانوادگی انتقال دهنده‌های غشایی نورو ترانسمیترها به دست می‌دهد. از این نوع دسته بندی جدید می‌توان در بررسی کیفیت مدل‌های ساختاری مربوط به پروتئین‌های غشایی غنی از هلیکس استفاده کرد.

سپاسگزاری

بدینوسیله از همکاری آقایان عبدالله شیرازی، حبیب طاهری و دکتر رهبر قاسمی صمیمانه تشکر و قدردانی می‌شود.

References:

1. Wang CI, Lewis RJ. Emerging structure function relationships defining monoamine NSS transporter substrate and ligand affinity. *Biochem Pharmacol* 2010; 15;79:1083-91.
2. Arkin IT, Brunger AT. Statistical analysis of predicted transmembrane α -helices. *Biochim Biophys Acta Mole Enzymol* 1998;8;1429:113-28.
3. Andersen J, Olsen L, Hansen KB, Taboureau O, Jorgensen FS, Jorgensen AM, et al. Mutational mapping and modeling of the binding site for S-citalopram in the human serotonin transporter. *J Biol Chem* 2010;285:2051-63.
4. Field JR, Henry LK, Blakely RD. Transmembrane domain 6 of the human serotonin transporter contributes to an

الگوهای با حداقل یکسانی ۳۰٪ را تایید کرده و نشان می‌دهد در مورد مدل‌سازی انتقال دهنده‌های غشایی نیز می‌توان بر این یافته‌ها تکیه کرد.

اهمیت بالینی پروتئین 5-HTT در طراحی داروهای ضد افسردگی در کنار غشایی بودن آن، منجر شده مطالعه‌ی ساختار و ترکیب اسیدهای آمینه‌ی این پروتئین اهمیت خاصی بیابد. آن چه در این پژوهش به انجام رسیده، آنالیز و دسته بندی ترکیب اسیدهای آمینه‌ی هلیکس‌های غشایی 5-HTT با روشی مبتنی بر جهت گیری زنجیره‌ی جانبی رزیدوها است. اهمیت چنین روش ابداعی دسته بندی در این مقاله آن است که اساس ساختار بسیاری از پروتئین‌های سر تا سر غشایی، هلیکس‌های غشایی آن‌هاست: چنان که بخش اعظم رزیدوهای این پروتئین‌ها در هلیکس‌های غشایی آن‌ها قرار می‌گیرد. بنا بر این دسته بندی رزیدوهای هلیکسی بر اساس جهت گیری زنجیره‌های جانبی می‌تواند در جنبه‌های مختلف آنالیز ساختاری این گروه از پروتئین‌ها و کسب اطلاعات جدید سودمند باشد. ترکیبات رزیدوهای به دست آمده در هر کدام از دسته‌ها، اطلاعات جالبی درباره‌ی عملکرد اسیدهای آمینه در هر کدام از موقعیت‌های چهارگانه به دست می‌دهد. بیشترین حضور رزیدوهای آب گریز در

aqueously accessible binding pocket for serotonin and the psychostimulant 3, 4-methylene dioxymethamphetamine. *J Biol Chem* 2010;285:11270-80.

5. Coleman JA, Green EM, Gouaux E. X-ray structures and mechanism of the human serotonin transporter. *Nature* 2016;532:334-9.

6. Zhang L, Liu L, Maltsev S, Lorigan GA, Dabney-Smith C. Investigating the interaction between peptides of the amphipathic helix of Hcf106 and the phospholipid bilayer by solid-state NMR spectroscopy. *Biochim Biophys Acta Biom* 2014;1838:413-8.

7. Ulmschneider MB, Sansom MS. Amino acid distributions in integral membrane protein structures. *Biochim Biophys Acta Biom* 2001;1512:1-4.

8. Hildebrand PW, Preissner R, Frommel C. Structural features of transmembrane helices. *FEBS Let* 2004 13;559:145-51.
9. Worch R, Bokel C, Hofinger S, Schwille P, Weidemann T. Focus on composition and interaction potential of single pass transmembrane domains. *Proteomics* 2010;10:4196-208.
10. Sinning S, Musgaard M, Jensen M, Severinsen K, Celik L, Kolds H, et al. Binding and orientation of tricyclic antidepressants within the central substrate site of the human serotonin transporter. *J Biol Chem* 2010; 12;285:8363-74.
11. Ravna AW, Sylte I, Dahl SG. Molecular mechanism of citalopram and cocaine interactions with neurotransmitter transporters. *J Pharmacol Exp Ther* 2003;307:34-41.
12. Hahn MK, Blakely RD. The functional impact of SLC6 transporter genetic variation. *Annu Rev Pharmacol Toxicol* 2007; 47:401-41.
13. Scanlon SM, Williams DC, Schloss P. Membrane cholesterol modulates serotonin transporter activity. *Biochemistry* 2001;40:10507-13.
14. Tusnady GE, Dosztanyi Z, Simon I. Transmembrane proteins in the protein data bank identification and classification. *Bioinformatics* 2004;20:2964-72.
15. Webb B, Sali A. Protein structure modeling with Modeller. *Protein Struct Pred* 2014:1-5.
16. Guex N, Peitsch MC. SWISS model and the Swiss Pdb viewer an environment for comparative protein modeling. *Electrophoresis* 1997;18:2714-23.
17. Gasteiger E, Hoogland C, Gattiker A, Duvaud SE, Wilkins MR, Appel RD, et al. Protein identification and analysis tools on the ExPASy server. *Humana Pre* 2005;22:141-6.
18. Kyte J, Doolittle RF. A simple method for displaying the hydropathic character of a protein. *J Mole Biol* 1982;157:105-32.
19. Pantano DA, Klein ML. Characterization of membraneprotein interactions for the leucine transporter from *Aquifex aeolicus* by molecular dynamics calculations. *J Phys Chem B* 2009;113:13715-22.
20. Chou PY, Fasman GD. Structural and functional role of leucine residues in proteins. *J Mole Biol* 1973;74:263-81.
21. Melicheroik M, Holubekova A, Hianik T, Urban J. Effect of the aminoacid composition of model α -helical peptides on the physical properties of lipid bilayers and peptide conformation a molecular dynamics simulation. *J Mole Mod* 2013;19:4723-30.
22. Jesus AJ, Allen TW. The role of tryptophan side chains in membrane protein anchoring and hydrophobic mismatch. *Biochim Biophys Acta Biome* 2013;1828:864-76.
23. Adamian L, Liang J. Helix helix packing and interfacial pairwise interactions of residues in membrane proteins. *J Mole Biol* 2001;311:891-907.
24. Degrado WF, Gratkowski H, Lear JD. How do helix-helix interactions help determine the folds of membrane proteins? Perspectives from the study of homo oligomeric helical bundles. *Protein Sci* 2003;12:647-65.
25. Bowie JU. Helix packing in membrane proteins. *J Mole Biol* 1997;272:780-9.
26. Forrest LR, Zhang YW, Jacobs MT, Gesmonde J, Xie L, Honig BH, et al. Mechanism for alternating access in neurotransmitter transporters. *Proceed National Acad Sci* 2008;105:10338-43.
27. Shi L, Quick M, Zhao Y, Weinstein H, Javitch JA. The mechanism of a neurotransmitter sodium symporter inward release of Na⁺ and substrate is triggered by substrate in a second binding site. *Mole Cell* 2008;30:667-77.
28. Forrest LR, Tang CL, Honig B. On the accuracy of homology modeling and sequence alignment methods applied to membrane proteins. *Biophys J* 2006;91:508-17.
29. Modi V, Xu Q, Adhikari S, Dunbrack RL. Assessment of template based modeling of protein structure in CASP11. *Proteins Struc Fun Bioinform* 2016;84:200-20.

30. Kufareva I, Katritch V, Stevens RC, Abagyan R. Advances in GPCR modeling evaluated by the GPCR Dock 2013

assessment meeting new challenges. Structure2014;22:1120-39.

Clustering Membrane Helical Residues in the Human Serotonin Transporter

Shariatpanahi A¹, Taghizadeh M^{2*}, Goliaei B², Madadkar Sobhani A²

(Received: February 6, 2017 Accepted: May 20, 2017)

Abstract

Introduction: Recently, 6 crystallographic structures of the pharmacologically important human serotonin transporter protein (5-HTT) were reported. In the present survey, two of these crystallographic structures and two homology models were used to study the distribution of 5-HTT's residues based on their position and orientation. The aim here was to understand the structural and functional roles of membrane helices better in transporters and the costs/benefits of using homology models in such studies.

Materials & methods: The membrane helical segments of 5-HTT were identified using a KD-hydrophathy plot. The classification of membrane helical residues into 4 groups (Lipid-facing, Lumen-facing, Right and Left) was done using a novel method considering residue positions. Also two 3D structural models of 5-HTT were generated using MODELLER based on templates with 38% and 60% similarities.

Findings: Although the majority of hydrophobic residues in membrane helices

were in the Lipid-facing cluster, a considerable percentage of them laid within the Lumen-facing cluster. In the Lipid-facing cluster, Ile, Leu, Val, Thr, Ala and Phe were the most frequent residues, respectively. Thus, their 3D positioning patterns were responsible for most of protein-lipid interactions and the functions of these interactions.

Discussion & conclusions: Judging by the correlation coefficients, Lipid-facing and Right clusters are the most similar. This suggests that helices may rotate during the outward-inward conformational switch of the transporters. Our model-crystal structure comparisons demonstrate that in the case of membrane transporters, using a template with 38% similarity, results in poor modeling of the membrane helices. These findings can help us understand the structure and function of membrane helices in transporter proteins better.

Keywords: Residue-level study, 5-HTT, Homology modeling, Membrane helices, Membrane transporters

1. Dept of Cell and Molecular Biology, Tehran University, Tehran, Iran

2. Institute of Biochemistry and Biophysics, Tehran University, Tehran, Iran

* Correspondin authorEmail: mtaghizadeh@alumni.ut.ac.ir