

مروری بر روش‌های آنالیز دستگاهی جهت تعیین مقدار متابولیت فعال کلپیدوگرل در محیط‌های بیولوژیک

ساره آقاجان پور^۱، نوید نیشابوری
نژاد^۲، محمدرضا رویینی^۳، یلدا
حسین‌زاده اردکانی^۴

^۱ دانشجوی داروسازی، آزمایشگاه
بیوفارماسی و فارماکوکینتیک، گروه
فارماسیوتیکس، دانشکده داروسازی،
دانشگاه علوم پزشکی تهران، تهران، ایران
^۲ دستیار گروه فارماسیوتیکس، آزمایشگاه
بیوفارماسی و فارماکوکینتیک، گروه
فارماسیوتیکس، دانشکده داروسازی،
دانشگاه علوم پزشکی تهران، تهران، ایران
^۳ استاد، آزمایشگاه بیوفارماسی و
فارماکوکینتیک، گروه فارماسیوتیکس،
دانشکده داروسازی، دانشگاه علوم پزشکی
تهران، تهران، ایران
^۴ دانشیار، آزمایشگاه بیوفارماسی و
فارماکوکینتیک، گروه فارماسیوتیکس،
دانشکده داروسازی، دانشگاه علوم پزشکی
تهران، تهران، ایران

چکیده

زمینه و هدف: با وجود مصرف گسترده پیش‌داروی کلپیدوگرل در طیف وسیعی از بیماران، محققان دریافتند که این دارو با دوز معمول در سه تا چهل درصد افراد مصرف‌کننده، اثرات آنتی پلاکتی کافی نخواهد داشت لذا تعیین مقدار متابولیت فعال کلپیدوگرل جهت ارزیابی اثرات این دارو در هر فرد ضروری به نظر می‌رسد.

بحث: با توجه به اهمیت تعیین سطح پلاسمایی متابولیت فعال کلپیدوگرل، در این مقاله به بررسی و مقایسه تمامی روش‌های آنالیز دستگاهی گزارش شده جهت تعیین مقدار متابولیت فعال کلپیدوگرل با هدف ارزیابی صحیح فارماکوکینتیک این دارو و در نهایت تجویز دوز مناسب در هر فرد پرداخته شد. با وجود گزارش‌های متعددی از روش آنالیز کلپیدوگرل، فقط سیزده مطالعه جهت آنالیز میزان متابولیت فعال کلپیدوگرل در ماتریس بیولوژیک منتشر شده است. بدلیل مقادیر بسیار کم این متابولیت‌ها متعاقب تجویز دوز معمول کلپیدوگرل عمدتاً از روش دستگاهی LC و یا موارد پیشرفته‌تر جهت آنالیز آن استفاده شده‌است. همچنین با توجه به غلظت بسیار کم متابولیت فعال کلپیدوگرل و نیمه عمر کوتاه آن در بدن، در صورتی که دستیابی به پروفایل کامل سطح پلاسمایی متابولیت دارو در برابر زمان مد نظر محقق باشد، روش بکار گرفته شده باید قابلیت اندازه‌گیری مقادیر در حد پیکو گرم بر میلی‌لیتر را داشته باشد ولی در غیر این صورت دستیابی به مقدار پایین پارامتر LLOQ ضروری نمی‌باشد.

نتیجه‌گیری: طبق جمع‌بندی کامل روش‌های آنالیزهای مورد بررسی در صورت دسترسی به سیستم‌های آنالیز دستگاهی جدیدتر نظیر UHPLC، تفکیک و تعیین مقدار آنالیت‌ها با دقت بسیار بیشتری صورت خواهد پذیرفت. همچنین بدلیل اینکه استفاده از آشکارساز MS/MS، امکان اندازه‌گیری سطح پلاسمایی خود داروی کلپیدوگرل را نیز مهیا می‌کند، می‌تواند داده‌های تکمیلی فراوانی را در اختیار محققین قرار دهد.

کلمات کلیدی: کلپیدوگرل، متابولیت فعال کلپیدوگرل، کروماتوگرافی، آنزیم CYP2C19

نویسنده مسئول:

دانشیار، آزمایشگاه بیوفارماسی و
فارماکوکینتیک، گروه فارماسیوتیکس،
دانشکده داروسازی، دانشگاه علوم پزشکی
تهران، تهران، ایران

۰۲۱-۶۴۱۲۰

Email: Yh-ardakani@tums.ac.ir

مقدمه

کلوییدوگرل با نام شیمیایی (S)- α -(2-chlorophenyl)-6,7-dihydrothieno[3,2-c]pyridin-5(4H)-acetate hydrogen sulfate، دارویی از نسل دوم مشتقات تینوپیریدینی می باشد که با اثرات ضد پلاکتی خود جهت کاهش حوادث آترواسکلویتیک متعاقب جراحی باز پیوند عروق قلب، آنژیوپلاستی به همراه استنت گذاری، سکتة مغزی و بیماری های شریانی تجویز می شود.^{۱،۲}

کلوییدوگرل پیش دارویی است که بخشی از آن در کبد به متابولیت فعال تیولی متابولیزه می شود. متابولیت تیولی با مهار سریع و برگشتناپذیر گیرنده P2Y₁₂ پلاکتی از اتصال آدنوزین دی فسفات به آن ممانعت نموده و در نهایت سبب مهار تجمع پلاکتی می شود. همان طور که در تصویر شماره ۱ مشاهده می شود، مسیر متابولیسمی کلوییدوگرل در کبد به صورت کلی به تولید دو دسته متابولیت منجر می شود:

الف- روند تولید متابولیت فعال: حدود ۱۵ درصد از کلوییدوگرل جذب شده، توسط گروهی از آنزیم های CYP450 کبدی (به ویژه آنزیم های CYP2C19، CYP1A2، CYP2B6، CYP3A4 و CYP2C9) به ۲-اکسو کلوییدوگرل متابولیزه می شود که خود طی چند مرحله می تواند متابولیت فعال تیولی (شامل H1 تا H4) را تولید کند که کمتر از ۱۰ درصد کل متابولیت ها را تشکیل می دهد. در واقع طی باز شدن حلقه موجود در ترکیب ۲-اکسو کلوییدوگرل، دو فرآیند استروشیمیایی مختلف می تواند رخ دهد و در نهایت مخلوط چهار دیاستروایزومر H1 تا H4 تولید شود. با توجه به تصویر شماره ۲، ساختارهای H1 تا H4 شامل ترکیب ۷-S-کلوییدوگرل هستند که به دلیل وجود پیوند دوگانه بین کربن شماره ۳ و ۱۶، به دو گروه دیاسترومری تقسیم شده اند. در متابولیت های ایزومری H1 و H2 پیوند دوگانه مذکور از نوع E و در ترکیبات H3 و H4 از نوع Z می باشد، همچنین با توجه به پیکربندی کربن شماره ۴ (R یا S) ترکیبات ایزومری از یکدیگر تفکیک می شوند.^{۳-۵}

ب- روند تولید متابولیت غیرفعال خود شامل دو مسیر زیر می باشد:

مسیر اول- حدود ۸۵ درصد کلوییدوگرل جذب شده در روند متابولیسم کبدی، توسط آنزیم کربوکسیلیک استراز (CES1) به

متابولیت غیرفعال با نام کلوییدوگرل کربوکسیلیک اسید متابولیزه می شود.

مسیر دوم- ۲-اکسو کلوییدوگرل علاوه بر تولید متابولیت فعال، می تواند، توسط نوعی دیگر از آنزیم استراز به ایزومر غیرفعال H-endo نیز هیدرولیز شود.^۶

با وجود اینکه در داده های فارماکودینامیکی آزمایشگاهی، فعالیت ضد پلاکتی متابولیت H2، معادل نیمی از فعالیت متابولیت H4، گزارش شده است ولی به دلیل مقادیر بسیار محدود این متابولیت در محیط بیولوژیک، فعالیت بیولوژیکی برای آن در نظر گرفته نمی شود؛ همچنین با ارزیابی فعالیت بیولوژیکی این چهار متابولیت در مطالعات متعدد اثبات شده است که متابولیت های H1 و H3 در محیط بیولوژیک، غیرفعال می باشند. در نتیجه ترکیب ایزومر H4، به عنوان متابولیت فعال اصلی و تنها دیاستروایزومر با اهمیت بالینی، جهت تعیین ویژگی های فارماکوکیتیک کلوییدوگرل و معیار میزان اثربخشی دارو در بدن، پذیرفته شده است.^۷

چالش اصلی جهت اندازه گیری متابولیت مذکور، شامل مواردی نظیر ناپایداری ترکیب، غلظت پایین آن در مایعات بیولوژیک و وجود چندین ترکیب مشابه این متابولیت به صورت هم زمان در پلاسما، می باشد. رخداد ناپایداری عموماً به دلیل حضور گروه تیولی در ساختار متابولیت های H1 تا H4 می باشد که قادر به تشکیل پیوند دی سولفیدی با برخی از اجزای موجود در خون و یا پلاسما همچون گلوکوتائون، سیستمین و یا سایر پروتئین های حاوی گروه سیستمینی می باشد. همچنین احتمال واکنش متابولیت ها با یکدیگر به طور بالقوه و دایمریزیشن نیز گزارش شده است که نهایتاً می تواند منجر به تخمین میزان کاذب این متابولیت ها در خون شود. بنابراین از مراحل ضروری که باید جهت تعیین مقدار صحیح این ماده انجام شود، پایداری سازی ترکیب مذکور خواهد بود. بدین منظور جهت به حداقل رساندن واکنش های جانبی بیان شده، یک عامل آلکیلایون کننده مانند ۲-برومو-۳-متوکسی استوفنون (MPB)، در هنگام جمع آوری نمونه، به خون گرفته شده از بیمار، افزوده می شود تا گروه های تیولی متابولیت ها، تثبیت شوند و سپس ترکیبات پایدار تشکیل شده، توسط روش های دستگاهی، تعیین مقدار می گردند.

غلظت پایین این ماده در مایعات بیولوژیک، عامل محدود

کننده دیگر در اندازه‌گیری صحیح متابولیت فعال کلپیدوگرل، محسوب می‌شود به نحوی که حداکثر غلظت پلاسمایی دارو متعاقب تجویز دوز معمول از آن، پایین‌تر از ۲۰ نانوگرم در هر میلی‌لیتر گزارش شده است. بنابراین، روش دستگاهی استفاده شده جهت تعیین مقدار این ماده، باید از میزان حداقل غلظت قابل اندازه‌گیری (LLOQ) مناسبی برخوردار بوده و همچنین به دلیل حضور دیاستروایزومرها در هنگام متابولیسم این دارو، (متابولیت‌های H1-H3)، اختصاصیت قابل قبولی نیز داشته باشد.^۸

تا پیش از این روش آنالیزهای متعددی جهت تعیین سطح کلپیدوگرل پیشنهاد شده بود که در مقاله مروری مرجع ۹ به جمع‌بندی آن‌ها پرداخته شده است اما طی مطالعات بالینی جدید، محققان دریافته‌اند که سه تا ۴۰ درصد از بیماران دریافت کننده دوز رایج درمانی کلپیدوگرل، اثرات آنتی پلاکتی مورد انتظار را نشان نمی‌دهند، لذا تعیین سطح کلپیدوگرل جهت پیش‌بینی اثرات ضد پلاکتی راهگشا نمی‌باشد و باید به بررسی و تعیین سطح متابولیت فعال کلپیدوگرل پرداخت.^۹

از مهم‌ترین عوامل بروز تفاوت‌های بین فردی بالا در غلظت پلاسمایی این متابولیت (H4) و نهایتاً ایجاد عملکرد ضد پلاکتی خارج از محدوده درمانی در بیماران، می‌توان به تفاوت در سطح آنزیم‌های دخیل در متابولیسم این دارو اشاره نمود که در ذیل به آن، پرداخته شده است:

به دلیل اهمیت فرآیند متابولیسم در فعال‌سازی این دارو، در افراد با پلی‌مورفیسم‌های ژنتیکی متفاوت، غلظت‌های متفاوتی از متابولیت فعال کلپیدوگرل در پلازما ایجاد خواهد شد. از آنجا که CYP2C19 نقشی اساسی در فرآیند متابولیسم طیف وسیعی از داروها شامل مهارکننده‌های پمپ پروتون (امپرازول)، ضدافسردگی‌های سه حلقه‌ای (آمی‌تریپتیلین)، مهارکننده‌های بازجذب سروتونین (سیتالوپرام)، ضدصرع‌ها (اس-مفینتوئین) و داروهای ضد پلاکت (کلپیدوگرل) دارد، وجود هر گونه پلی‌مورفیسم ژنتیکی آن، می‌تواند منجر به بروز تغییرات گسترده‌ای در متابولیسم این داروها گردد.^{۱۰-۱۲}

در همین راستا، اداره غذا و داروی آمریکا، نیز به بررسی حضور ال‌های CYP2C19*2/*3 به عنوان ال‌های پرخطر که فعالیت متابولیسمی در آن‌ها وجود ندارد و به شدت سبب کاهش

سطح متابولیت فعال کلپیدوگرل و متعاقب آن کاهش اثرات ضدپلاکتی آن می‌شود، توجه ویژه نموده است.

نیاز به فعال‌سازی داروی کلپیدوگرل توسط برخی از آنزیم‌های سیتوکروم کبدی، این دارو را مستعد تداخل بالقوه با سایر داروهای مصرفی نموده و از سوی دیگر، به دلیل افزایش احتمال تأثیرپذیری و تغییر فعالیت آنزیم‌های مذکور از برخی بیماری‌های زمینه‌ای، اهمیت این مهم دوجندان می‌نماید. به نحوی که اگر برخی از داروهای تجویز شده و یا شرایط خاص بیمار، موجب مهار یا القای تبدیل کلپیدوگرل به متابولیت‌های فعال شوند، به ترتیب می‌توانند غلظت متابولیت فعال پلازما را کاهش یا افزایش دهند. برای مثال در مطالعات، اثبات شده است که برخی شرایط التهابی مانند دیابت، چاقی و سن بالا می‌توانند بر عملکرد آنزیم‌های کبدی مؤثر باشند.^{۱۳}

طبق مطالعه متاآنالیزی که توسط Snoep و همکارانش^{۱۳} انجام شد، مشاهده گردید که از هر پنج بیمار دریافت کننده کلپیدوگرل، یک نفر به درمان با پلاویکس (برند کلپیدوگرل) پاسخ مناسب نمی‌دهد، به نحوی که در این افراد، عوارض بالینی نامطلوب از جمله سکته قلبی، سندرم حاد کرونری و ... تا هشت برابر بیشتر از سایرین بروز می‌نماید. همچنین در بررسی ژنتیکی آنزیم CYP2C19 در طی این مطالعه، شیوع ال CYP2C19*2 به صورت هتروزیگوت معادل ۳/۲۳ درصد و به صورت هموزیگوت برابر ۹/۳ درصد گزارش شده است. در مطالعه متاآنالیز دیگری که در جمعیت آمریکایی و اروپایی انجام شده است، در ۲۱ درصد از بیماران تحت درمان با کلپیدوگرل، کاهش و یا عدم مهار تجمع پلاکت گزارش شده است. پاسخ‌های ضعیف گزارش شده به کلپیدوگرل، با افزایش خطر حوادث ایسکمیک مکرر همراه خواهد بود.^{۱۵،۱۴}

قابل ذکر است با وجود تمرکز مطالعات جدید فارماکوکینتیک بر بهره‌گیری از محیط بیولوژیک غیر خونی نظیر بزاق و ادرار جهت تعیین مقدار بسیاری از داروها، بر تعیین غلظت متابولیت فعال کلپیدوگرل در این حوزه‌ها مطالعه‌ای یافت نشد.^{۱۶}

از آنجا که اخیراً در نتایج مطالعه‌ای با عنوان کاربرد داروی کلپیدوگرل ذکر شده است که علی‌رغم حضور داروهای نسل سوم مهارکننده گیرنده P2Y12 در بازار دارویی (پراشوگرل و تیکاگرل)،

به دلیل اثرگذاری مناسب، ایمنی کافی، هزینه پایین، دسترسی و شناخت خوب از کلوییدوگرل، همچنان این دارو به عنوان ضدپلاکت مهمی مطرح است، انجام پژوهش‌هایی جهت میزان اثرگذاری آن ضروری است.^{۱۷} همچنین براساس بسیاری از مطالعات صورت پذیرفته، وجود ال‌های غیر فعال آنزیم‌های متابولسمی در بیماران، به تنهایی قادر به توضیح جامعی از عدم بروز پاسخ درمانی متعاقب مصرف این دارو نمی‌باشد، به نظر می‌رسد تعیین سطح پلاسمایی متابولیت فعال دارو، همچنان و تاکنون، روشی قابل اعتماد، جهت تعیین دوز درمانی مناسب در بیماران باشد. از سوی دیگر، حتی در صورت انجام مطالعه ژنتیکی آنزیم‌های دخیل در متابولسم دارو، تعیین سطح متابولیت فعال همچنان ضروری خواهد بود. لذا در این مقاله مروری، روش‌های دستگاهی موجود جهت آنالیز متابولیت فعال کلوییدوگرل بررسی و جمع‌بندی خواهد شد.

در ادامه بخش مقدمه به گزارش موردی روش‌های آنالیز موجود برای تعیین مقدار متابولیت فعال کلوییدوگرل در ماتریس بیولوژیک پرداخته خواهد شد.

الف- روش‌های دستگاهی بدون استفاده از پایدارکننده‌های متابولیت‌های تیولی

با وجود اینکه طی مطالعاتی مشخص شد میان سطح پلاسمایی متابولیت غیرفعال کلوییدوگرل کربوکسیلیک اسید و میزان مهار تجمع پلاکتی در پلاسما رابطه معناداری وجود ندارد، تعیین فارماکوکینتیک کلوییدوگرل در ابتدا با تعیین سطح پلاسمایی این متابولیت انجام می‌شد که به دلیل غلظت بیشتر آن در پلاسما نسبت به متابولیت تیولی، توسط دستگاه‌های متعددی شامل LC-UV، GC-MS و LC-MS تعیین مقدار می‌گردید.^{۱۸،۱۹}

با انجام پژوهش‌هایی مانند مطالعه Delavenne و همکاران، که با هدف توسعه یک روش آنالیز دستگاهی جهت تعیین مقدار کلوییدوگرل، متابولیت‌های فعال و غیرفعال آن توسط دستگاه LC-MS/MS انجام شد، ارزیابی فارماکوکینتیک کلوییدوگرل توسط متابولیت فعال آن صورت گرفت. در این پژوهش طی ۱۳/۵ دقیقه جداسازی کلوییدوگرل تغییرنیافته و متابولیت‌های فعال و غیرفعال آن از پلاسمای نمونه‌های انسانی جداسازی شدند اما به دلیل عدم پایدارسازی متابولیت تیولی، این مطالعه موفق به رسم منحنی کالیبراسیون برای متابولیت فعال کلوییدوگرل نشد.^{۲۰}

ب- روش‌های دستگاهی با استفاده از پایدارکننده‌های متابولیت‌های تیولی

برای نخستین بار در سال ۲۰۰۸، Takahashi و همکاران ترکیب MPB را به عنوان پایدار کننده متابولیت‌های تیولی پیش از آغاز آنالیز آن پیشنهاد دادند. در این مطالعه، اولین روش معتبرسازی شده توسط دستگاه LC-MS/MS، جهت شناسایی و جداسازی متابولیت تیولی کلوییدوگرل، متعاقب پایدار نمودن آن، ابداع شده است. در این پژوهش، نشان داده شد که غلظت متابولیت‌های تیولی، در صورت عدم استفاده از پایدارکننده، می‌تواند تنها در طی ۱۰ دقیقه، به کمتر از ۸۰ درصد غلظت اولیه برسد، به طوری که در مطالعات پیشین، غلظت متابولیت‌های تیولی، در حدود ۹۰ درصد کمتر از این مطالعه، گزارش شده بود. روش دستگاهی ارائه شده در این مطالعه قادر به تعیین مقدار آنالیت مورد نظر تا غلظت ۰/۵ نانوگرم در میلی‌لیتر در پلاسما در کمتر از ۵ دقیقه می‌باشد.

به منظور ارزیابی بالینی این روش، ۳۰۰ میلی‌گرم کلوییدوگرل به ۶۶ داوطلب سالم تجویز و نمونه‌گیری در زمان‌های مختلف انجام گردید. حداکثر غلظت پلاسمایی متابولیت تیولی معادل ۳/۱۹ $\pm$ ۹/۳۵ نانوگرم در میلی‌لیتر، پس از گذشت یک ساعت از تجویز دارو گزارش گردید.^۸

در سال ۲۰۱۰، روش آنالیز دستگاهی سریع‌تری نسبت به مطالعه گذشته و با استفاده از دستگاه UPLC-MS/MS توسط Delavenne و همکاران، به منظور تعیین مقدار متابولیت‌های تیولی در پلاسمای انسان با استفاده از پایدارکننده MPB، گزارش گردید. به نحوی که آنالیت مورد نظر با دقت تقریباً مشابه با مطالعه قبل (حداقل غلظت قابل اندازه‌گیری برابر با غلظت ۸/۰ نانوگرم در میلی‌لیتر)، در کمتر از ۱/۵ دقیقه قابل تعیین مقدار می‌باشد. به منظور ارزیابی بالینی روش ابداع شده، کلوییدوگرل با دوز ۶۰۰ میلی‌گرم به نه داوطلب سالم تجویز و نمودار غلظت پلاسمایی متابولیت مورد نظر در برابر زمان رسم گردید. در این مطالعه، حداکثر غلظت پلاسمایی متابولیت تیولی معادل ۹/۳۰ $\pm$ ۶/۸۲ نانوگرم در میلی پس از گذشت ۰/۱ $\pm$ ۴/۰ ساعت از تجویز آن، گزارش گردید.^{۲۱}

در سال ۲۰۱۱، روش دستگاهی دیگری با هدف ارزیابی تأثیر مصرف همزمان امپرازول و پنتوپرازول بر سطح متابولیت فعال H4، گزارش گردید. در این پژوهش، Angiolillo و همکاران با استفاده

از ستون Shim-Pack XR-ODS II و روش پایداری سازی مشابه با مرجع شماره ۸، موفق به جداسازی متابولیت‌های تیولی H3 و H4 از یکدیگر شدند.^{۲۲}

همان‌گونه که در مقدمه بیان گردید، متابولیت فعال تیولی کلپیدوگرل از چهار دیاستروایزومر تشکیل شده‌اند که Tuffal و همکاران برای نخستین بار در سال ۲۰۱۱ موفق به طراحی روشی استرئوسلکتیو جهت جداسازی چهار متابولیت تیولی در نمونه‌های آزمایشگاهی از یکدیگر شدند. با نظر به اینکه اختصاص به معنای عدم تداخل پیک داخلی با پیک مورد نظر است این مهم در این روش آنالیز حاصل شد. در این روش آنالیز برای نخستین بار، با بکارگیری سیستم UHPLC-MS و در طی مدت زمان هشت دقیقه، جداسازی مشتقات متابولیت تیولی از یکدیگر گزارش شده است. پایداری سازی نمونه‌ها مطابق مرجع شماره ۸ انجام و کارایی روش ابداع شده در یک کارآزمایی بالینی بررسی گردیده است. بر طبق نتایج این مطالعه، سطح پلاسمایی مشتق متابولیت‌های H1 و H2 در نمونه بالینی بسیار کم بوده و قابل اندازه‌گیری نبودند.^{۲۳}

شایان ذکر است که در تمامی مطالعاتی که تاکنون شرح داده شد، تنها سطح پلاسمایی متابولیت‌های فعال تیولی مورد بررسی قرار گرفته و امکان همزمانی تعیین آن با سطح پلاسمایی داروی اصلی برای نخستین بار توسط Peer و همکاران و با بکارگیری دستگاه UHPLC-MS/MS گزارش گردید. روش ارائه شده قادر به تعیین سطح پلاسمایی کلپیدوگرل تا غلظت ۰/۱۰ نانوگرم بر میلی‌لیتر و تعیین سطح متابولیت‌های تیولی تا غلظت ۱/۰ نانوگرم بر میلی‌لیتر می‌باشد. پایداری سازی نمونه‌ها همچنان مطابق روش ذکر شده در مرجع شماره ۸ صورت پذیرفته است. باتوجه به تعیین ژنوتایپ آنزیم CYP2C19 در داوطلبین شرکت کننده در کارآزمایی بالینی این مطالعه، مشخص گردید که ال‌هایی که موجب عدم عملکرد آنزیم مذکور می‌گردند، کاهش قابل توجهی را در حداکثر غلظت پلاسمایی کلپیدوگرل و متابولیت فعال آن نشان می‌دهند.^{۲۴}

در سال ۲۰۱۳ نیز گزارش‌های جدیدی جهت آنالیز کلپیدوگرل و متابولیت‌های آن ارائه گردید که با توجه به عدم مشاهده تغییرات قابل توجه نسبت به مطالعات گذشته، تنها به ذکر نقاط قوت آن‌ها بسنده خواهد شد. در این سال، Furlong و همکاران یک روش جهت جداسازی چهار دیاستروایزومر

متابولیت‌های تیولی کلپیدوگرل توسط دستگاه HPLC-MS/MS ارائه نمودند. تنها مزیت این گزارش نسبت به روش‌های پیشین، ایجاد LLOQ پایین‌تر جهت تعیین سطح متابولیت‌های H1 و H2 می‌باشد ولی با این وجود، دو متابولیت مذکور در هیچ یک از نمونه‌های بالینی ردیابی نشدند.^{۲۵}

در مطالعه دیگری، Karażniewicz-Lada و همکاران روشی را ارائه نمودند که قادر به جداسازی و تعیین مقدار چهار آنالیت مشتق متابولیت تیولی H3، مشتق متابولیت تیولی H4، کلپیدوگرل و همچنین متابولیت غیر فعال کلپیدوگرل کربوکسیلیک اسید به‌صورت همزمان توسط دستگاه HPLC-MS/MS بود. در این مطالعه با استفاده از روش الکتروفورز لوله موئین، نشان داده شد که در صورت عدم پایداری سازی توسط ترکیب MPB، متابولیت غیرفعال کربوکسیلیک اسید کلپیدوگرل قابل اندازه‌گیری خواهد بود.^{۲۶}

Park و همکاران با معرفی روش جدیدی توسط دستگاه LC-MS/MS، کلپیدوگرل و متابولیت تیولی آن را در طی مدت زمان دو دقیقه تعیین مقدار نمودند. همچنین علاوه بر کاهش قابل توجه در مدت زمان آنالیز، در این روش برای نخستین بار از ترکیب tris(2-carboxyethyl)phosphine به عنوان پایدار کننده با مکانیسم کاهنده پیوند دی‌سولفیدی بین متابولیت‌های تیولی با دیگر عوامل دارای گروه تیولی در پلازما استفاده شد. در ارزیابی کارایی بالینی روش مذکور میزان ۱۵۰ میلی‌گرم دارو به شش داوطلب سالم تجویز شد که حداکثر غلظت پلاسمایی متابولیت تیولی کلپیدوگرل معادل $3/39 \pm 1/54$ نانوگرم در میلی‌لیتر و حداکثر غلظت پلاسمایی کلپیدوگرل برابر $51/4 \pm 95/4$ نانوگرم در میلی‌لیتر گزارش شده است. همچنین در این مطالعه، به دلیل عدم مشاهده ارتباط معنادار میان حداکثر غلظت پلاسمایی و یا سطح زیر منحنی غلظت-زمان متابولیت تیولی کلپیدوگرل با پارامترهای مشابه مربوط به کلپیدوگرل، بر اهمیت تعیین سطح متابولیت تیولی فعال در راستای ارزیابی عملکرد کلپیدوگرل، تأکید شده است.^{۲۷}

در سال ۲۰۱۵ روش آنالیزی بر پایه دستگاه UHPLC-MS/MS ارائه شد که علاوه بر جداسازی همزمان کلپیدوگرل و متابولیت تیولی H4، قادر به تعیین مقدار سایر متابولیت‌های غیر فعال نظیر کلپیدوگرل کربوکسیلیک اسید، ۲-اکسو کلپیدوگرل و H-endo نیز

بحث

به منظور سهولت در مقایسه روش‌های موجود با یکدیگر و انتخاب روش مناسب، خلاصه ویژگی‌های روش‌های آنالیز دستگاهی بررسی شده جهت تعیین مقدار متابولیت‌های فعال کلپیدوگرل در پلاسما انسان، سگ، گربه و موش صحرایی در جدول شماره ۱ آورده شده است که در ذیل به برخی از مهم‌ترین نکات آن پرداخته خواهد شد.

سیستم کروماتوگرافی

همان‌طور که در بخش قبل توضیح داده شد، بعد از تجویز دوز معمول کلپیدوگرل غلظت متابولیت‌های تیولی فعال آن در پلاسما بسیار کم بوده و امکان تعیین سطح آنالیت‌های مذکور توسط دستگاه HPLC-UV، وجود ندارد و در تمامی گزارش‌های انجام شده با استفاده از این دستگاه، تنها به تعیین مقدار متابولیت غیر فعال کربوکسیلیک اسید اکتفا شده است. به بیان دیگر، تعیین صحیح سطح پلاسمایی این آنالیت‌ها با آشکارساز MS/MS امکان‌پذیر می‌باشد که بدین منظور، این آشکارساز با دستگاه‌های HPLC و UHPLC همگام می‌گردد. اصول ساختاری این دو دستگاه تقریباً مشابه می‌باشد ولی در مواردی دستگاه UHPLC در جداسازی ترکیبات با ساختار مشابه، عملکرد بهتری از خود نشان می‌دهد. از مهم‌ترین ویژگی‌های این دستگاه می‌توان به اندازه ذرات سیلیکا در ستون‌های بکارگرفته شده در آن اشاره نمود؛ به نحوی که اندازه ذرات، کمتر از ۲ میکرومتر است که ساختاری نسبتاً یکپارچه و در هم تنیده را به‌عنوان فاز ساکن کروماتوگرافی فراهم می‌آورد. از سوی دیگر، استفاده از درجه حرارت بالا در این سیستم، موجب کاهش گرانروی فاز متحرک و در نتیجه افزایش سرعت جریان، به‌همراه کاهش قابل توجه در فشار سیستم نسبت به شرایط مشابه در دستگاه HPLC می‌گردد. همراهی دو عامل مذکور، مسیرهای جریانی به هم پیوسته را ایجاد می‌نماید که توسط افزایش کارایی ستون، امکان تفکیک مواد با ساختارهای مشابه را به خوبی فراهم می‌آورد. در پنج مطالعه از سیزده مطالعه مرور شده که موفق به تعیین مقدار دقیق متابولیت H4 کلپیدوگرل شده‌اند، از دستگاه

در پلاسما می‌باشد. البته باید توجه داشت که برخلاف مطالعات پیشین، متابولیت‌های مذکور در این مطالعه توسط انکوباسیون سلول‌های میکروزومال کبدی انسانی تولید شده است.^{۲۸}

با ورود داروهایی نظیر ویکاگرل با عملکرد مشابه کلپیدوگرل به بازار دارویی، روش آنالیز دستگاهی توسط UHPLC-MS/MS با امکان تعیین مقدار هم‌زمان کلپیدوگرل و ویکاگرل به همراه امکان جداسازی متابولیت‌های فعال H4 و غیر فعال H3 و SM-3 (بیشترین متابولیت تولید شده پس از تجویز ویکاگرل) در پلاسما با هدف مقایسه فارماکوکینتیک دو دارو، در سال ۲۰۱۷ ارائه شد. شایان ذکر است که پایداری نمونه‌ها پلاسمایی مشابه با روند ذکر شده در مطالعه Takahashi و همکاران^{۲۹} صورت گرفته است. همچنین در این سال دو مطالعه دیگر نیز در این راستا ارائه شدند که در مطالعه نخست، Xue و همکاران با هدف تعیین سطح متابولیت تیولی فعال کلپیدوگرل در پلاسما Beagle Dog روش LC-MS/MS را گزارش کردند که به مزیت ویژه‌ای نسبت به گزارش‌های پیشین در آن اشاره نشده است.^{۳۰}

همچنین به دلیل تجویز کلپیدوگرل به عنوان ضدپلاکت رایج در گربه‌ها، در مطالعه دوم، Lyngby و همکاران، روش آنالیز دستگاهی جهت تعیین سطح پلاسمایی کلپیدوگرل، مشتق متابولیت تیولی کلپیدوگرل، ۲-اکسو کلپیدوگرل و متابولیت غیرفعال ۲-اکسو کربوکسیلیک اسید توسط HPLC-MS/MS، در پلاسما این حیوان ارائه دادند که به دلیل مشخص شدن ناپایداری متابولیت ۲-اکسو کلپیدوگرل در طی مطالعات پایداری، سایر آزمون‌ها بر روی این ترکیب انجام نگردید.^{۳۱}

با توجه به جستجوی انجام شده در منابع، آخرین مطالعه با استفاده از دستگاه LC-MS/MS در سال ۲۰۱۹، با هدف تعیین تأثیر مصرف الکل، به عنوان مهارکننده آنزیم CES1، بر متابولیسم کلپیدوگرل و با امکان تعیین سطح کلپیدوگرل، کلپیدوگرل کربوکسیلات، ۲-اکسو کلپیدوگرل، ۲-اکسو کلپیدوگرل کربوکسیلات، H4، اتیل کلپیدوگرل و اتیل ۲-اکسو کلپیدوگرل در پلاسما موش صحرایی توسط Laizure و همکاران ارائه شده است. نتایج این بررسی نشان می‌دهد که تغییر سطح آنزیم CES1 می‌تواند موجب تغییرات قابل توجه در نحوه متابولیسم کلپیدوگرل گردد.^{۳۲}

تفکیک متابولیت فعال H4، به‌طور هم‌زمان، کلپیدوگرل و متابولیت اصلی آن (کلپیدوگرل کربوکسیلیک اسید) نیز، تعیین مقدار شده‌اند، لذا با استفاده از روش‌های دستگاهی اخیر، امکان محاسبه دقیق نسبت متابولیکی (نسبت غلظت متابولیت به غلظت دارو) فراهم می‌گردد که در بسیاری از مطالعات فارماکوکینتیکی، پارامتر مهمی محسوب می‌شود. از معایب مهم این دو مطالعه می‌توان به افزایش کاذب سطح متابولیت غیر فعال H3، به دلیل عدم تفکیک ایزومر H2 از آن و همچنین زمان کروماتوگرافی طولانی مطالعه Park و همکاران^{۲۶} اشاره نمود.

در مطالعه بالینی Zhao Xue و همکاران^{۲۹}، علاوه بر تجویز کلپیدوگرل، تجویز خوراکی داروی ویکاگرل (آنالوگ جدید کلپیدوگرل) نیز با رعایت فاصله زمانی تجویز، به برخی از افراد مورد مطالعه صورت گرفته است. در این مطالعه، علاوه بر آنالیت‌های H3 و H4 کلپیدوگرل، آنالیت H3 متیله غیر فعال (SM3) نیز به عنوان فراوان‌ترین متابولیت داروی ویکاگرل در پلاسما، معرفی و اندازه‌گیری شده است. شایان ذکر است که متابولیت مذکور (SM3)، پس از تجویز خوراکی کلپیدوگرل نیز، در پلاسمای انسانی یافت شده است.

در آخرین مطالعه صورت پذیرفته در این راستا، تأثیر مهار آنزیم CES1 به‌واسطه مصرف همزمان الکل، بر متابولیسم کلپیدوگرل در مدل موش صحرایی مورد بررسی قرار گرفته است که با توجه به تولید متابولیت‌های ۲-اکسو کلپیدوگرل و ۲-اکسوکلپیدوگرل کربوکسیلات به‌واسطه این آنزیم، دو آنالیت مذکور نیز علاوه بر آنالیت‌های کلپیدوگرل، متابولیت فعال H4 و متابولیت غیر فعال کلپیدوگرل کربوکسیلات جداسازی و تعیین مقدار شده‌اند. همچنین علاوه بر ترکیبات یاد شده، آنالیت‌های اتیل H4، اتیل کلپیدوگرل و اتیل ۲-اکسوکلپیدوگرل نیز که تشکیل آن‌ها به دلیل حضور الکل در بدن حیوان محتمل خواهد بود، در پلاسمای موش صحرایی تعیین مقدار شدند.^{۳۳}

ستون کروماتوگرافی

به‌طور کلی، در مطالعات توسعه روش آنالیز، ستون‌های کروماتوگرافی مختلف با توجه به خواص فیزیکی شیمیایی آنالیت مورد نظر، بررسی شده و در نهایت براساس زمان بازداری کمتر و

UPLC استفاده شده است که امکان تفکیک این متابولیت را با کمترین LLOQ نسبت به سایر مطالعات فراهم آورده‌است. همچنین به دلیل اعمال فشار بالا در این روش، آنالیز مواد با سرعت بسیار بیشتری نسبت به دستگاه HPLC انجام می‌گردد. برای مثال، کمترین زمان جداسازی برای ترکیبات مورد نظر در این مطالعه در مقاله رویینی و همکاران^{۱۸} و به میزان ۵/۱ دقیقه بوده است که با استفاده از دستگاه UPLC گزارش شده است.

پایدارسازی متابولیت‌های تیولی

از سوی دیگر با توجه به ناپایداری متابولیت‌های تیولی فعال در نمونه‌های خونی جمع‌آوری شده، تعیین مقدار صحیح این ترکیبات در مایعات بیولوژیک، با پیشنهاد پایدارسازی گروه‌های تیولی، بلافاصله پس از نمونه‌گیری با استفاده از ترکیب MPB میسر گردید که در تمامی روش‌های آنالیز دستگاهی مطابق مطالعه Takahashi و همکاران^۸ این روش معتبر سازی شده بکار گرفته شده است و تنها در یک گزارش در مطالعه Hua و همکاران^{۲۷} از ترکیب کاهنده TCEP استفاده شده است. این ترکیب با احیا نمودن پیوند میان گروه‌های تیولی به اندازه‌گیری سطح دقیق متابولیت فعال کلپیدوگرل کمک می‌کند. مزیت استفاده از این ترکیب کاهنده نسبت به ترکیب پایدار کننده MPB، عدم نیاز به افزودن آن بلافاصله پس از نمونه‌گیری عنوان شده است.

ترکیبات جداسازی شده

همانگونه که ذکر گردید، جداسازی و تعیین مقدار متابولیت فعال تیولی جهت بررسی دقیق عملکرد آنتی پلاکتی کلپیدوگرل در هر فرد ضروری می‌باشد. لذا در این مطالعه مروری نیز بر روش‌های گزارش شده با توانایی اندازه‌گیری این متابولیت بیشتر تمرکز شده است. خلاصه روش‌های دستگاهی مذکور در جدول شماره ۲ آورده شده است. در این میان، روش‌های دستگاهی نظیر مطالعه Tuffal و همکاران^۷، علاوه بر جداسازی متابولیت فعال تیولی H4 از سایر متابولیت‌های تیولی، قادر به تفکیک سایر اجزای این ترکیب نیز (H1 تا H4) هستند که تعیین مقدار صحیح‌تری از ترکیب فعال مورد نظر (H4) را فراهم خواهد ساخت. همچنین در دو مطالعه Park و همکاران^{۲۶} و Liu و همکاران^{۲۸}، علاوه بر امکان

دما، کوتاه نمودن زمان بازداری است و معمولاً با هر درجه افزایش دمای ستون، به طور میانگین یک تا دو درصد از طول زمان آنالیز کاسته می شود.^{۳۳}

فاز متحرک

در مطالعات مرور شده جهت آنالیز داروی کلپیدوگرل و متابولیت های آن، از ترکیبات متفاوتی به عنوان فاز متحرک استفاده شده است. به طور کلی بررسی این مطالعات نشان می دهد که افزودن آمونیوم بی کربنات به فاز آبی فاز متحرک، موجب دستیابی به پیک های بهتری خواهد شد و همچنین افزودن اسید فرمیک و کاهش pH فاز متحرک، تأثیر بسزایی در تفکیک دو دیاسترومر H2 و H4 از یکدیگر خواهد داشت. در صورت نیاز به جداسازی متابولیت غیرفعال کلپیدوگرل کربوکسیلیک اسید نیز، افزودن متانول به فاز آلی (به جای استفاده از استونیتریل) نتایج بهتری در پی خواهد داشت.

حداقل غلظت قابل اندازه گیری (LLOQ)

به دلیل غلظت پلاسمایی پایین و نیمه عمر کوتاه آنالیت های مورد بررسی، مقدار LLOQ از اهمیت ویژه ای در روش های آنالیز معتبر سازی شده برخوردار است و هرچه مقدار آن کمتر گزارش شده باشد، روش مورد نظر، نتایج قابل اعتمادتری را در پی خواهد داشت. در میان روش های آنالیز دستگاهی مورد بررسی در خصوص تعیین مقدار متابولیت تیولی H4، کمترین میزان LLOQ، معادل با ۰/۰۵ نانوگرم بر میلی لیتر در Liu و همکاران^{۲۸} شده است که با توجه به فارماکوکینتیک این متابولیت، میزانی مناسب جهت تعیین مقدار آن به نظر می رسد.

نتیجه گیری

باتوجه به مشاهده مقاومت بسیاری از بیماران، به پاسخگویی به درمان با داروی کلپیدوگرل و فراوانی نسبتاً بالای الل های دارای ویژگی کاهش عملکرد آنزیم CYP 450 2C19 در جمعیت ایرانی، انجام مطالعه ای جامع با هدف جمع بندی مناسب ترین روش آنالیز دستگاهی، جهت سنجش سطح پلاسمایی متابولیت فعال

شکل پیک مطلوب تر، ستون کروماتوگرافی نهایی انتخاب می شود. با توجه به اینکه متابولیت فعال کلپیدوگرل، ترکیبی نسبتاً هیدروفیل ($\text{LogP}=1.96$) و دارای خاصیت بازی می باشد، ستون های بکار گرفته شده در این زمینه، همگی از نوع ستون های C8 و یا C18 انتخاب شده اند که ستون هایی مناسب برای کروماتوگرافی فاز معکوس می باشند.

در میان ستون های بکار گرفته شده در دستگاه HPLC MS/MS، ستون ASCENTIC C18، به دلیل طراحی بهینه سیلیکاژل (تیپ B) و ایجاد سطحی وسیع، به تخلخل مناسب با حضور حداقل گروه های سیلانولی آزاد دست یافته است که کارایی مناسبی را در محدوده گسترده ای از pH (۱/۰-۵) فراهم می نماید. به همین دلیل با وجود عدم استفاده از دستگاه UPLC در مطالعه Lyngby و همکاران^{۲۰}، زمان بازداری مناسبی (کمتر از ۲ دقیقه) برای تفکیک آنالیت ها گزارش شده است.

در مطالعات انجام شده توسط سیستم UHPLC، ستون کروماتوگرافی BEH C18، بیشترین کاربرد را داشته است که از مزایای آن می توان به توانایی جداسازی در زمان کمتر با رزولوشن بیشتر، تحمل مناسب نسبت به فاز متحرک در گستره وسیعی از pH (۱۲-۱)، استحکام و ظرفیت آنالیز تعداد زیادی از نمونه های بیولوژیک اشاره نمود. این مقاومت، حاصل سه نوع پیوند متفاوتی است که زنجیره های کربنی را در این ستون به ذرات سیلیکا متصل می نماید. با وجود اینکه هزینه و سرعت آنالیز در صورت استفاده از ستون BEH C8 در سیستم های وابسته به UPLC، منطقی به نظر می رسد ولی به طور کلی کارایی و شکل پیک ها در هنگام استفاده از ستون C18، بهتر بوده است؛ به نحوی که امکان تفکیک متابولیت های H1 تا H4 تنها در صورت استفاده از ستون C18، فراهم شده است.

دمای ستون کروماتوگرافی

دمای ستون کروماتوگرافی در روش های مختلف مورد بررسی، بین ۲۴ تا ۴۵ درجه سانتی گراد متغیر بوده است. به طور کلی و در شرایط کروماتوگرافی یکسان، با افزایش دمای ستون، جداسازی در زمانی کمتر، با کارایی بیشتر، حساسیت بهتر و قدرت تفکیک بالاتر صورت خواهد پذیرفت. البته در اکثر مواقع، هدف اصلی از افزایش

کلپیدوگرل ضروری می‌نماید. با توجه به آنچه بیان شد می‌توان نتیجه‌گیری نمود که جهت دستیابی به داده‌های دقیق فارماکوکینتیکی این دارو به همراه تحلیل و محاسبه دقیق دوز مناسب در هر بیمار، تعیین مقدار متابولیت فعال تیولی H4، بسیار ضروری است، البته امکان اندازه‌گیری سطح پلاسمایی خود دارو نیز می‌تواند داده‌های تکمیلی فراوانی را در اختیار محققین قرار دهد. جهت حصول به این مهم، استفاده از آشکارساز MS/MS ضروری می‌نماید بدیهی است در صورت دسترسی به سیستم‌های آنالیز دستگاهی جدیدتر نظیر UHPLC، تفکیک و تعیین مقدار آنالیت‌ها با دقت بسیار

بیشتری صورت خواهد پذیرفت. از دیگر نکات مهمی که بهتر است در هنگام انتخاب روش دستگاهی مد نظر قرار گیرد، می‌توان به مقدار LLOQ در روش گزارش شده، اشاره نمود. با توجه به غلظت بسیار کم آنالیت‌های اصلی مورد اشاره و همچنین نیمه عمر کوتاه آن‌ها در بدن، در صورتی که دستیابی به پروفایل کامل سطح پلاسمایی متابولیت دارو در برابر زمان مد نظر محقق باشد، روش بکار گرفته شده باید قابلیت اندازه‌گیری مقادیر در حد پیکو گرم بر میلی‌لیتر را داشته باشد ولی در غیر این صورت دستیابی به مقدار پایین پارامتر LLOQ ضروری نمی‌باشد.

جدول ۱: خلاصه روش‌های دستگاهی جهت تعیین مقدار کلپیدوگرل و یا متابولیت‌های آن

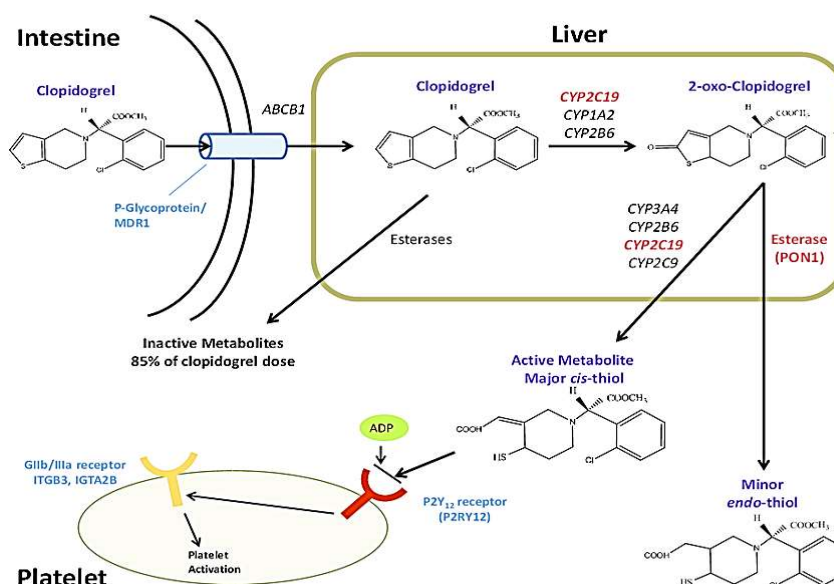
شماره مرجع	سال انتشار	روش دستگاهی	آنالیت‌ها	نسبت جرم به بار m/z	ابعاد ستون mm×mm× μm	نوع ستون	دمای ستون °C	فاز متحرک	سرعت جریان ml/min	زمان اجرا min	محدوده خطی بودن ng/ml	LLO Q ng/ml
۱	۸	۲۰۰۸	LC-MS/MS	CAMD	۳۵۴→۵۰۴	۵×۲.۱×۵۰	Inertsil ODS-3	۴	متانول	۰.۲	۵۰-۰/۵	۰.۵
۲	۷	۲۰۱۰	UHPLC-MS	CAMD	→۵۰۴.۲ ۱۵۵	۱/۷×۱×۱۰۰	BEH C8	۴	فرمیک اسید آب دیونیزه استونیتریل	۰.۲	۵۰-۱	۰.۸
۳	۲۱	۲۰۱۰	LC-MS/MS	H3, H4	-	۲/۲×۲×۷۵	Shim-Pack XR-ODS II	۳ ۵	آب دیونیزه استونیتریل فرمیک اسید	۰.۵	۲۵۰-۰/۵	۰.۵
۴	۲۲	۲۰۱۱	UHPLC-MS	H1, H2, H3, H4, MP-H endo	۱۵۵→۵۰۴	۲/۲×۲×۷۵	Shim-pack XR-ODS II	/	آب دیونیزه استونیتریل فرمیک اسید آمونوم استات	۰.۵	۲۵۰-۰/۵	۰.۵
۵	۲۳	۲۰۱۲	UHPLC-MS/MS	CLP	→۳۲۲.۰ ۲۱۲.۱	۲/۱×۵۰	BEH C18	۴	آب دیونیزه استونیتریل	۰.۵	۵۰-۰/۰۱	۰/۰۱
۶	۲۵	۲۰۱۳	HPLC-MS/MS	CAMD H1, H2, H3 H4	۱۵۵→۵۰۴ /	/	Ascentis Express RP-amide	/	فرمیک اسید /	/	۱۵۰-۰/۱ -۰/۱۲۵ ۱۲۵ -۰/۱۰۱ ۱۰۱	۰/۱ ۰.۱۲ ۵ ۰.۱۰ ۱
۷	۲۶	۲۰۱۳	LC-MS/MS	H3, H4 CLP CLPM	→۵۰۴.۱ ۱۵۵ →۳۲۲.۱ ۲۱۲ →۳۰۸.۱ ۱۹۸	۲.۱×۱۰۰ ۳/۵×	Zorbax Plus C18	۴ ۰	آب دیونیزه استونیتریل فرمیک اسید	۰.۳۵	۱۲/۵ ۵۰-۰/۲۵ -۰/۲۵ ۵۰ -۵۰ ۱۰۰۰۰	۰/۲۵ ۰/۲۵ ۵۰.۰ ۰
۸	۲۷	۲۰۱۳	LC-MS/MS	CAM CLP	→۳۵۶.۱ ۱۵۵.۲ →۳۲۲ ۲۱۱.۹	۳×۲×۵۰	C18 RP column	۴ ۰	آب دیونیزه استونیتریل فرمیک اسید	۰.۳	۲۰۰-۰.۵ ۲۰-۰.۰۵	۰.۵ ۰.۰۵

ادامه جدول ۱: خلاصه روش‌های دستگاهی جهت تعیین مقدار کلوییدوگرل و یا متابولیت‌های آن

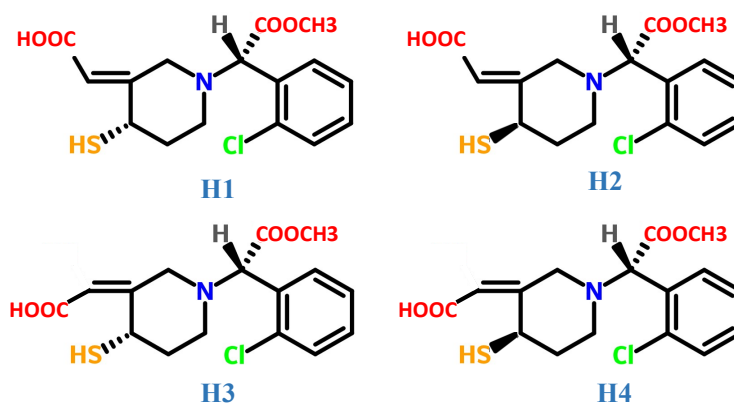
ردیف	شماره مرجع	سال انتشار	روش دستگاهی	آتالیت‌ها	نسبت جرم به بار m/z	ابعاد ستون mm×mm× μm	نوع ستون	دمای ستون C°	فاز متحرک	سرعت جریان ml/min	زمان اجرا min	محدوده خطی بودن ng/ml	LLO Q ng/ml
۹	۲۸	۲۰۱۵	UHPLC-MS/MS	H4	۵۰۴.۱→ ۱۵۵	۱۰۰×۲.۱× ۲.۵	X Bridge TM BEH C18	۳۰	آب دیونیزه استونیتریل	۰.۶۳	۵.۵	۵۰-۰.۰۵	۰.۰۵
				CLP	۳۲۲.۱→ ۱۸۴.۱				فرمیک اسید متانول			۲۵-۰.۰۵	۰.۰۵
				CLPM Mp-H endo 2-oxo	۳۰۹.۰→ ۱۷۰.۰							۵۰۰۰-۵	۵
۱۰	۲۹	۲۰۱۷	UHPLC-MS/MS	H3, H4	۵۰۴→۱۵۵	۱۰۰×۲.۱× ۱.۷	BEH C18	۴۵	آب دیونیزه استونیتریل	۰.۴۵	۶	-۰.۱۰۰	۰.۱۰
				SM3	۳۷۰→۲۱۲				فرمیک اسید			-۱.۰۰	۱.۰۰
												۱۰۰۰	
۱۱	۳۰	۲۰۱۷	LC-MS/MS	CAMD	۵۰۴.۱→ ۳۵۴.۱	۵۰×۴.۶×۵	Ascentis C18	۴۰	استونیتریل فرمیک اسید	۱	۴	۱۰۰۰-۱	۱
۱۲	۳۱	۲۰۱۷	HPLC-MS/MS	CAMD	۵۰۴.۴→ ۱۵۵.۲	۱۵۰×۲	C18	/	آب دیونیزه استونیتریل	۰.۴	۷	۱۰۰-۱	۱
				CLP	۳۲۲.۲→ ۲۱۲.۱				فرمیک اسید			-۰.۸	۰.۸
				CLPM	۳۰۸.۱→ ۱۹۸.۱							-۲۰۰	۲۰۰
												۱۰۰۰۰	
۱۳	۳۲	۲۰۱۹	LC-MS/MS	CLP	۳۲۲→۲۱۲	۱۰۰×۲.۱	Waters XSelect CSH C18	۲۴	آب دیونیزه استونیتریل	۰.۳	۸	/	۰.۵۵
				CLP Carboxylate	۳۰۸→۱۹۸				فرمیک اسید				۲.۷۴
				2-oxo CLP	۳۳۸→۱۵۵								۱.۳۷
				2-oxo CLP Carboxylate	۳۲۴→۱۶۹								۱.۳۷
				H4	۵۰۴→۱۵۵								۰.۶۹
				Ethyl clp	۳۳۶→۲۲۶								۱.۳۷
				Ethyl 2-oxo clp	۳۵۲→۱۲۵								/
				Ethyl H4	۵۱۸→۱۲۵								/

تعیین مقدار متابولیت غیرفعال کلوییدوگرل در نمونه‌های پایدار نشده در این مطالعه استفاده شده است.
۳- سرعت حلال به صورت خطی تا دقیقه ۵/۵ به ۰/۷ میلی‌لیتر بر دقیقه رسید.

نکات زیر در این جدول باید مد نظر قرار گیرد:
۱- مشتق متابولیت‌های فعال کلوییدوگرل (CAMD) در واقع همان متابولیت تیولی شامل: H1، H2، H3 و H4 می‌باشد که MPB به آن افزوده و واکنش داده است.
۲- روش الکتروفورز مویین با نمایشگر ماورای بنفش برای



شکل ۱: فعال‌سازی متابولیکی داروی کلپیدوگرل- ابتدا در طی روند اکسیداسیون توسط آنزیم‌های CYP2C19، CYP1A2 و CYP2B6 متابولیت واسط ۲-اکسو کلپیدوگرل تولید شده و سپس متابولیت فعال، در طی مراحل آنزیمی بعدی و توسط آنزیم‌های CYP3A4، CYP2B6، CYP2C19 و CYP2C9 تولید می‌شود.^۵



شکل ۲: ساختار شیمیایی متابولیت‌های تیولی کلپیدوگرل

References

1. SINGH, Sonu S., Kuldeep SHARMA, Deepak BAROT, P. Ram MOHAN, and Vidya B. LOHRAY. "PLAVIX™, RxMed: Pharmaceutical Information PLAVIX™, RxMed: Pharmaceutical Information." Journal of chromatography. B, Analytical technologies in the biomedical and life sciences 2005;821(2): 173-180.
2. Pan, Yuesong, Weiqi Chen, Yun Xu, Xingyang Yi, Yan Han, Qingwu Yang, Xin Li et al. "Genetic polymorphisms and clopidogrel efficacy for acute ischemic stroke or transient ischemic attack: a systematic review and meta-analysis." Circulation 2017;135(1): 21-33.

3. Kazui, Miho, Yumi Nishiya, Tomoko Ishizuka, Katsunobu Hagihara, Nagy A. Farid, Osamu Okazaki, Toshihiko Ikeda, and Atsushi Kurihara. "Identification of the human cytochrome P450 enzymes involved in the two oxidative steps in the bioactivation of clopidogrel to its pharmacologically active metabolite." *Drug Metabolism and Disposition* 2010;38(1): 92-99.
4. Farid, Nagy A., Atsushi Kurihara, and Steven A. Wrighton. "Metabolism and disposition of the thienopyridine antiplatelet drugs ticlopidine, clopidogrel, and prasugrel in humans." *The Journal of Clinical Pharmacology* 2010;50(2): 126-142.
5. Dansette, Patrick M., Julien Rosi, Gildas Bertho, and Daniel ansuy. "Paraoxonase-1 and clopidogrel efficacy." *Nature medicine* 2011;17(9): 1040.
6. Casey Laizure, S., Vanessa Herring, Zheyi Hu, Kevin Witbrodt, and Robert B. Parker. "The role of human carboxylesterases in drug metabolism: have we overlooked their importance." *Pharmacotherapy: The Journal of Human Pharmacology and Drug Therapy* 2013;33(2): 210-222.
7. Tuffal, Gilles, Sebastien Roy, Melanie Lavis, Denis Brasseur, Joe Schofield, Nathalie Delesque Touchard, Pierre Savi et al. "An improved method for specific and quantitative determination of the clopidogrel active metabolite isomers in human plasma." *Thrombosis and haemostasis* 2011; 105 (04): 696-705.
8. Takahashi, Makoto, Henrianna Pang, Kiyoshi Kawabata, Nagy A. Farid, and Atsushi Kurihara. "Quantitative determination of clopidogrel active metabolite in human plasma by LC-MS/MS." *Journal of pharmaceutical and biomedical analysis* 2008;48(4): 1219-1224.
9. Abell, Lynn M., and Eddie C-K. Liu. "Dissecting the activation of thienopyridines by cytochromes P450 using a pharmacodynamic assay in vitro." *Journal of Pharmacology and Experimental Therapeutics* 2011;339(2): 589-596.
10. Angiolillo, D. J., C. M. Gibson, S. Cheng, C. Ollier, O. Nicolas, L. Bergougnan, L. Perrin, F. P. LaCreta, F. Hurbin, and M. Dubar. "Differential effects of omeprazole and pantoprazole on the pharmacodynamics and pharmacokinetics of clopidogrel in healthy subjects: randomized, placebo-controlled, crossover comparison studies." *Clinical Pharmacology & Therapeutics* 2011;89(1): 65-74.
11. Payan, Maryam, Nader Tajik, Mohammad Reza Rouini, and Mohammad Hossein Ghahremani. "Genotype and allele frequency of CYP2C19* 17 in a healthy Iranian population." *Medical journal of the Islamic Republic of Iran* 2015;29: 269.
12. Neyshaburinezhad, Navid, Mohammad Reza Rouini, Hanieh Entezari, Hoda Lavasani, and Yalda Hosseinzadeh Ardakani. "Evaluation of changes in cytochrome P450 2C19 activity in type 2 diabetic rats before and after treatment, by using isolated perfused liver model." *Iranian Journal of Basic Medical Sciences* 2020.
13. Snoep, Jaapjan D., Marcel MC Hovens, Jeroen CJ Eikenboom, Johanna G. van der Bom, J. Wouter Jukema, and Menno V. Huisman. "Clopidogrel nonresponsiveness in patients undergoing percutaneous coronary intervention with stenting: a systematic review and meta-analysis." *American heart journal* 2007;154(2): 221-231.
14. Sameer, Abu-Eid I., Gharbieh M. Amany, Abed A. Abdela, and Sharif A. Fadel. "CYP2C19 genotypes in a population of healthy volunteers and in children with hematological malignancies in Gaza Strip." *Journal of Population Therapeutics and Clinical Pharmacology* 2009;16 (1).
15. Ardakani, Yalda H., and Mohammad-Reza Rouini. "Improved liquid chromatographic method for the simultaneous determination of tramadol and its three main metabolites in human plasma, urine and saliva." *Journal of pharmaceutical and biomedical analysis* 2007;44 (5): 1168-1173.
16. Patti, Giuseppe, Giuseppe Micieli, Claudio Cimminiello, and Leonardo Bolognese. "The Role of Clopidogrel in 2020: A Reappraisal." *Cardiovascular Therapeutics* 2020 .
17. Rouini, Mohammad-Reza, Yalda H. Ardakani, Alireza Foroumadi, Hoda Lavasani, and Lida Hakemi. "Sensitive quantification of carboxylic acid metabolite of clopidogrel in human plasma by LC with UV detection." *Chromatographia* 2009;70 (5-6): 953-956.
18. Mani, Helen, Stefan W. Toennes, Birgit Linnemann, Dorota A. Urbanek, Jan Schwonberg, Gerold F. Kauert, and Edelgard Lindhoff-Last. "Determination of clopidogrel main metabolite in plasma: a useful tool for monitoring therapy?." *Therapeutic drug monitoring* 2008;30 (1): 84-89.
19. Taubert, Dirk, Adnan Kastrati, Steffi Harlfinger, Olga Gorchakova, Andreas Lazar, Nicolas von Beckerath, Albert Schömig, and Edgar Schömig. "Pharmacokinetics of clopidogrel after administration of a high loading dose." *Thrombosis and haemostasis* 2004;92 (8): 311-316.
20. Delavenne, Xavier, Thierry Basset, Paul Zufferey, Nora Malouk, Silvy Laporte, and Patrick Mismetti. "Ultra-performance LC MS/MS method for quantification of clopidogrel active metabolite." *Journal of separation science* 2010;33 (13): 1968-1972.

21. Angiolillo, D. J., C. M. Gibson, S. Cheng, C. Ollier, O. Nicolas, L. Bergougnan, L. Perrin, F. P. LaCreta, F. Hurbin, and M. Dubar. "Differential effects of omeprazole and pantoprazole on the pharmacodynamics and pharmacokinetics of clopidogrel in healthy subjects: randomized, placebo-controlled, crossover comparison studies." *Clinical Pharmacology & Therapeutics* 2011;89 (1): 65-74.
22. Rouini, Mohammad-Reza, Yalda Hosseinzadeh Ardakani, Faezeh Soltani, Hassan Y. Aboul-Enein, and Alireza Foroumadi. "Development and validation of a rapid HPLC method for simultaneous determination of tramadol, and its two main metabolites in human plasma." *Journal of Chromatography* 2006;B 830 (2): 207-211.
23. Peer, Cody J., Shawn D. Spencer, Dustin AH VanDenBerg, Michael A. Pacanowski, Richard B. Horenstein, and William D. Figg. "A sensitive and rapid ultra HPLC-MS/MS method for the simultaneous detection of clopidogrel and its derivatized active thiol metabolite in human plasma." *Journal of Chromatography* 2012;B 880: 132-139.
24. Furlong, Michael T., Ishani Savant, Moucun Yuan, Laura Scott, William Mylott, Thomas Mariannino, Pathanjali Kadiyala, Vikram Roongta, and Mark E. Arnold. "A validated HPLC-MS/MS assay for quantifying unstable pharmacologically active metabolites of clopidogrel in human plasma: application to a clinical pharmacokinetic study." *Journal of Chromatography* 2013;B 926: 36-41.
25. Karaźniewicz-Łada, Marta, Dorota Danielak, Paweł Burchardt, Łukasz Kruszyna, Anna Komosa, Maciej Lesiak, and Franciszek Główka. "Clinical pharmacokinetics of clopidogrel and its metabolites in patients with cardiovascular diseases." *Clinical pharmacokinetics* 2014;53 (2): 155-164.
26. Park, Jung Bae, Soo Hyeon Bae, Su-Min Jang, Won Jun Noh, Jang-Hee Hong, Kee Dong Yoon, Han Chang Kang, and Soo Kyung Bae. "Direct measurement of active thiol metabolite levels of clopidogrel in human plasma using tris (2-carboxyethyl) phosphine as a reducing agent by LC-MS/MS." *Journal of separation science* 2013;36 (14): 2306-2314.
27. Hua, Wenyi, Michael Lesslie, Brian T. Hoffman, Christopher Binns, and Daniel Mulvana. "Development of a sensitive and fast UHPLC-MS/MS method for determination of clopidogrel, clopidogrel acid and clopidogrel active metabolite H4 in human plasma." *Bioanalysis* 2015;7 (12): 1471-1482.
28. Liu, Cai, Youming Lu, Hongbin Sun, Jin Yang, Yongqiang Liu, Xiaojuan Lai, Yanchun Gong et al. "Development and validation of a sensitive and rapid UHPLC-MS/MS method for the simultaneous quantification of the common active and inactive metabolites of vicagrel and clopidogrel in human plasma." *Journal of pharmaceutical and biomedical analysis* 2018;149: 394-402.
29. Zhao Xue, Sun Hui, Zhang Qi, Ren Tian-ming, GU jing-kai. "Determination of Clopidogrel Active metabolite in Beagle Dog Plasma by LC-MS/MS." *Journal of Chinese mass spectrometry society* 2017 ;38(4).
30. Lyngby, Janne G., Michael H. Court, and Pamela M. Lee. "Validation of a method for quantitation of the clopidogrel active metabolite, clopidogrel, clopidogrel carboxylic acid, and 2-oxo-clopidogrel in feline plasma." *Journal of veterinary cardiology* 2017;19 (4): 384-395.
31. Laizure, S. Casey, Zhe-Yi Hu, Philip M. Potter, and Robert B. Parker. "Inhibition of carboxylesterase-1 alters clopidogrel metabolism and disposition." *Xenobiotica* 2020;50 (3): 245-251.
32. Greibrokk, Tyge, and Thomas Andersen. "Temperature programming in liquid chromatography." *Journal of separation science* 2001;24 (12): 899-909.

Sareh Aghajani¹,
Navid Neyshaburinezhad²,
Mohammadreza Rouini³,
Yalda Hoseinzadeh
Ardakani^{*4}

¹ Pharm.D. student, School of
Pharmacy, Tehran University
of Medical Sciences, Tehran,
Iran.

² Ph.D. candidate of
Pharmaceutics,
Biopharmaceutics and
Pharmacokinetic Division,
Department of Pharmaceutics,
School of Pharmacy, Tehran
University of Medical Sciences,
Tehran, Iran.

³ Full Professor of
Pharmaceutics,
Biopharmaceutics and
Pharmacokinetic Division,
Department of Pharmaceutics,
School of Pharmacy, Tehran
University of Medical Sciences,
Tehran, Iran.

⁴ Associate Professor of
Pharmaceutics,
Biopharmaceutics and
Pharmacokinetic Division,
Department of Pharmaceutics,
School of Pharmacy, Tehran
University of Medical Sciences,
Tehran, Iran

A Review of Analytical Methods for the Measurements of Clopidogrel Active Metabolite in Biological Matrices

Received: 20 Oct 2020 ; Accepted: 26 Feb 2021

Abstract

Introduction: Despite the widespread use of clopidogrel as a prodrug in a wide range of patients, the researchers found that the drug couldn't have sufficient antiplatelet effects at a usual dose in three to forty percent of patients. So on, measuring clopidogrel active metabolite concentration is seems necessary to evaluate the effects of this drug in each patient.

Discussion: Due to the importance of determining clopidogrel active metabolite plasma level, in this article, we reviewed and compared all the analysis methods for that which could affects on correct pharmacokinetic evaluation of clopidogrel and thus play an important role in prescribing the appropriate dose of that in each individual therapy. Despite numerous reports of the clopidogrel analysis method, only thirteen studies have been published to analyzing the concentration of clopidogrel active metabolite in a biological matrices. As a result of the very low concentration and short half-life of the clopidogrel active metabolite in the biological matrix, the method used for determining it's concentration profile should be able to measure values in picogram per millilitre scale.

Discussion: According to the complete summary of the analyzing methods, employing advanced device analysis systems such as UHPLC lead to much more accurate separation and quantification of analytes. Also, employing the MS / MS detector adding the possibility of measuring the clopidogrel plasma level in the same matrices.

Keywords: Clopidogrel, Clopidogrel Active Metabolite, Chromatography, CYP2C19 enzyme

***Corresponding Author:**
Department of Pharmaceutics,
School of Pharmacy

Tel: 02164120
E-mail: Yh-ardakani@tums.ac.ir