

بررسی اثرات کاربرد ماکروسیکلیک دی‌آمید دی‌بنزوسولفوکسید بر فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیداتیو، بیومارکرهای حاصل از تخریب رادیکال‌های اکسیژنی و خصوصیات بافت‌شناسی کبد و بیضه موش نژاد Balb/C

مسعود مشهدی اکبر بوجار، مهناز آذرینیا، عباس شکروی:

دانشگاه تربیت معلم

حامد دانش‌پژوه: دانشگاه پیام نور

چکیده

ماکروسیکلیک دی‌آمید دی‌بنزوسولفوکسید، ترکیبی است با ساختار حلقوی-تاجی شکل و دارای گروه‌های فعال آمیدی، اکسیژنی و سولفوکسید. داخل حلقه آن آب‌گریز است و می‌تواند با کاتیون‌های سدیم، پتاسیم یا کلسیم پیوند دهد و به دلیل خاصیت چربی‌دوستی در خارج از حلقه خود می‌تواند از عرض غشاء عبور کند. پژوهش حاضر با هدف تعیین پاسخ آنزیم‌های آنتی‌اکسیداتیو به اثر غلظت‌های متفاوت این ترکیب پس از تزریق درون صفاقی به موش‌های نژاد Balb/C انجام گرفت. هم‌چنین مقادیر بیومارکرهای حاصل از تخریب رادیکال‌های اکسیژنی بررسی شدند. نتایج نشان داد که میزان LD_{۵۰} این دارو ۲۵۰۰ میکروگرم بر کیلوگرم وزن بدن است. به موش‌های بررسی شده دوز LD_{۵۰} با غلظت ۱۵۰۰ میکروگرم بر کیلوگرم وزن بدن به‌صورت منفرد تزریق شد. بعد از یک هفته بررسی بافت‌شناسی کبد نشان داد که سلول‌های هپاتوسیت، طناب‌های هپاتوسیتی، سلول‌های کوپفر، سینوزوئیدها و فضای پورتال در مقایسه با گروه شاهد هیچ‌گونه تغییر معنی‌داری نیافتند. در حالی‌که بافت‌شناسی بیضه‌ها نشان داد که حجم و وزن بیضه، تعداد سلول‌های بینابینی، قطر لوله‌های منی‌ساز، تعداد سلول‌های اسپرماتوگونی نوع A و B، اسپرماتوسیت اولیه، اسپرماتید و اسپرماتوزوئید و سلول‌های سرتولی به‌طور معنی‌داری کاهش یافتند. فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیداتیو شامل سوپراکسید دیسموتاز، کاتالاز، گلوتاتیون پراکسیداز در کبد و بیضه در یک روند وابسته به غلظت رو به افزایش گذاشتند در صورتی‌که این افزایش برای بیومارکرهای تخریب اکسیداتیو یعنی مالون دی‌آلدئید و دی‌تیروزین فقط در بافت بیضه و در خون محیطی مشاهده شد. بنا بر این با توجه به پژوهش حاضر نتیجه‌گیری می‌شود که ترکیب مورد استفاده دارای اثرات سمی بوده است. بعد از یک هفته از کاربرد آن در زیر غلظت LD_{۵۰}، بافت بیضه به نحو شاخص تحت تأثیر قرار گرفت، ولی بافت کبد احتمالاً به دلیل قابلیت‌های متابولیک زیاد در متابولیسم مواد و توان بیشتر فعالیت آنتی‌اکسیدانی، اثرات نامطلوب بافتی نشان نداد.

واژه‌های کلیدی: ماکروسیکلیک دی‌آمید، سمیت زیست‌شناختی، آسیب اکسیداتیو، آنزیم‌های آنتی‌اکسیداتیو، بیضه، کبد

پذیرش ۸۷/۵/۲۰

دریافت ۸۶/۱۰/۲۴

مقدمه

ماکروسیکلک دی‌آمیدها ترکیباتی هستند که در مسیر تولید آزاکرون اترها (Aza Crown Ethers) به وجود آمده و خالص می‌گردند. بنا بر این بسیاری از خواص کرون اترها را که ترکیباتی هتروسیکلک هستند دارا می‌باشند؛ از جمله این که همانند آن‌ها از واحدهای اتیلن اکساید با پیوندهای کووالانس که مجموعاً یک حلقه تاجی شکل تشکیل می‌دهند ساخته شده‌اند. در ماکروسیکلک دی‌آمیدها به جای اتم‌های اکسیژن کرون اتر، -NR_n(NH) جای‌گزین می‌شود و در نتیجه آزاکرون اتر به‌وجود می‌آید. در ترکیب بررسی شده، عامل سولفوکسید به جای یک اتم اکسیژن مستقر شده و بدین ترتیب سه اتم اکسیژن، گوگرد و ازت دارند. این جای‌گزینی‌ها به ثبات بیشتر و همچنین قدرت افزون‌تری اتصالات فلز به داخل حلقه تاجی شکل می‌انجامد [۱]، [۲].

این مواد با داشتن عوامل شیمیایی غیرقطبی در خارج از حلقه خود، خاصیت آب‌گریزی و در داخل خود خاصیت آب‌دوستی دارند. از همین روی، می‌توانند از محیط لیپیدی غشاهای زیستی عبور کنند این در حالی است که یون‌های فلزات قلیایی خاکی و کلسیم می‌توانند به داخل حلقه نفوذ و سپس به آن متصل شده و با انتقال از عرض غشاء منجر به تغییر غلظت این یون‌ها در یکی از دو طرف غشاء گردند که پیامدهای متابولیک و فیزیولوژیک به دنبال دارد [۳]، [۴].

بررسی کرون اترها و مشتقات آن‌ها در طی سال‌های اخیر دستاوردهای جدید و با ارزشی در داروشناسی و زیست‌شناسی داشته است که زمینه استفاده گسترده از آن‌ها را حتی در پزشکی فراهم نموده است؛ به طوری که برخی از آن‌ها به دلیل اثرات ضدایسکمی [۵] و ضد سرطانی [۶] مورد استفاده قرار گرفته‌اند. از آنجا که همواره گونه‌های جدید از این ترکیبات ساخته می‌شوند، لازم است اثرات سمیت سلولی-باقی آن‌ها، خصوصاً در شرایط *in vivo* پیش از کاربرد در انسان بررسی شود تا در صورت لزوم در سطوح پایین‌تر از غلظت سمی، امکان استفاده هدف‌دار از آن‌ها فراهم شود. در صورتی‌که اثرات سمی از این مواد شیمیایی به عنوان مواد گزنوبیوتیک مشاهده شود القای استرس اکسیداتیو می‌تواند از مؤثرترین مسیرهای متابولیکی برای اعمال این‌گونه اثرات زیستی باشد که طی آن تولید گونه‌های رادیکال اکسیژنی افزایش می‌یابد [۷].

این رادیکال‌ها به‌طور طبیعی در موجودات هوازی در طی متابولیسم تولید می‌شوند، ولی غلظت آن‌ها با سیستم دفاعی همواره در سطح پایین نگه داشته می‌شود [۸]. هنگام رویارویی سیستم زنده با مواد شیمیایی و مداخله آن‌ها با مسیرهای متابولیک اکسیداتیو ممکن است تولید این گونه رادیکال‌های اکسیژنی افزایش یابد. در این صورت به دلیل فعالیت و واکنش‌پذیری فوق‌العاده، این رادیکال‌ها به مولکول‌های پروتئین، لیپید و حتی DNA سلول‌ها آسیب وارد می‌کنند [۹]، [۱۰]. پژوهش‌گران برای بررسی این گونه فرایندهای اکسیداتیو، مقدار تام "رادیکال‌های اکسیژنی" را در بافت‌ها اندازه‌گیری می‌کنند ولی به دلیل نیمه عمر کوتاه رادیکال‌های اکسیژنی

سنجش آن‌ها دقیق نیست. از این رو محصولات پایدار حاصل از تخریب آن‌ها را به عنوان "بیومارکرهای تخریب اکسیداتیو" می‌سنجند. معتبرترین و باارزش‌ترین این بیومارکرها شامل مالون دی‌آلدئید و دی‌تیروزین است که به ترتیب به عنوان بیومارکرهای تخریب اکسیداتیو لیپید و پروتئین تولید می‌شوند [۱۱]. از سوی دیگر، برای مقابله با عوامل رادیکالی اکسیژنی سیستم دفاعی آنزیم‌ها وجود دارد که مهم‌ترین اعضای آن شامل سوپراکسید دیسموتاز، کاتالاز و گلوکاتایون پراکسیداز است. سوپراکسید دیسموتاز باعث تبدیل رادیکال سوپراکسید به آب اکسیژنه می‌شود که خود هم با سایر آنزیم‌ها خصوصاً کاتالاز تجزیه می‌گردد [۱۳]، [۱۲]. گلوکاتایون پراکسیداز هم از تخریب اکسیداتیو لیپیدهای غشاء جلوگیری می‌کند [۱۴].

هدف پژوهش حاضر، تعیین اثرات کاربرد ماکروسیکل دی‌آمید دی‌بنزوسولفوکسید بر فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیداتیو، بیومارکرهای حاصل از تخریب رادیکال‌های اکسیژنی و خصوصیات بافت‌شناسی کبد و بیضهٔ موش نژاد Balb/C به طریق تزریق درون صفاقی است. همچنین سطح سمیت آن بر این حیوان ارزیابی می‌شود.

مواد و روش‌ها

حیوان

از آن‌جا که نوع بررسی، تجربی بوده است برای این منظور موش‌های بالغ نژاد Balb/C از انستیتو پاستور ایران خریداری شد و پس از انتقال به حیوان‌خانه مدتی برای سازگاری با محیط جدید نگهداری شدند. در طول آزمایش دمای محیط $24 \pm 2^\circ\text{C}$ بود غذای موش‌ها یکسان و به‌صورت پلیت آماده شده استاندارد از شرکت دام و طیور پارس تهیه گردید.

مواد

مواد شیمیایی مورد استفاده خصوصاً آنزیم‌ها همگی با خلوص زیاد از کارخانه مرک و سیگما تهیه شدند. ماکروسیکل دی‌آمید دی‌بنزوسولفوکسید از آزمایشگاه شیمی آلی دانشگاه تربیت معلم تهران با خلوص ۹۸/۹۹٪ در اختیار پژوهندگان قرار گرفت.

تزریق

بر اساس وزن هر موش (۲۲-۲۵ گرم) مقدار ماده تزریقی که محلول آن با فیلتر میلی‌پور ۰/۴۵ میکرون استریل شده بود تعیین و با سرنگ به درون حفرهٔ صفاقی تزریق گردید. از آب مقطر به عنوان حلال استفاده شد.

خون‌گیری، استخراج بافت‌ها و تهیهٔ مقاطع بافتی

درموش‌های گروه‌های شاهد و تجربی سه سرموش استفاده و پس از پایان زمان تیمار، موش‌ها با اتر بی‌هوش

و با قطع کردن بزرگ سیاهرگ زیرین و زیرین خون‌گیری انجام شد. سپس حفره شکم باز شده، کبد و بیضه‌ها خارج و هر کدام با سرم فیزیولوژی شستشو شدند.

تعیین غلظت LD ۵

بدین منظور ماده مورد نظر با غلظت‌های مختلف، ولی حجم‌های مساوی در فاصله غلظتی صفر تا ۲۵۰۰ میکروگرم بر کیلوگرم وزن موش‌ها به آنان تزریق شد. مقادیر غلظتی شامل ۵۰۰، ۱۰۰۰، ۱۵۰۰، ۲۰۰۰ و ۲۵۰۰ میکروگرم بر کیلوگرم وزن بدن بودند. پس از ۲۴ ساعت ضمن مشخص شدن LD ۵۰ که در آن ۵۰٪ موش‌ها مرده بودند از همه موش‌های تیمار شده و شاهد خون‌گیری و میزان فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانت و بیومارکرهای تخریب اکسیداتیو ارزیابی شدند.

ثبوت بافتی و رنگ‌آمیزی

نمونه‌های بافتی در فیکساتور بوئن به مدت ۱۸ تا ۲۴ ساعت قرار گرفتند سپس مراحل آب‌گیری با الکل اتیلیک انجام گرفت. نمونه‌ها با تولوئن الکل‌گیری شدند. در مرحله بعد پارافین در اتوکلاو به نمونه‌ها نفوذ داده شد و سپس قالب‌گیری و برش زده شد. نوارهای پارافین برش زده شد با فرمالین ۲٪ پوشیده شد و نهایتاً روی لام پهن و خشک گردیدند. برای رنگ‌آمیزی هسته سلول‌ها از هماتوکسیلین و برای سیتوپلاسم از ائوزین استفاده شد.

جداسازی سلول‌های خون

مقدار ۰/۲ میلی‌لیتر خون محیطی جدا و پلاسما آن پس از سانتریفیوژ در ۳۰۰۰g به مدت ۱۵ دقیقه تفکیک شد. لایه سلول‌های قرمز برداشت و در سالیان ایزوتونیک با نسبت دو برابر حجم سلول‌ها با $\text{pH}=7$ شستشو گردید این سلول‌ها با دو برابر حجم خود با آب مقطر همولیز شدند. سپس در ۱۵۰۰۰g به مدت ۴۰ دقیقه سانتریفیوژ و مایع رویی جهت سنجش شاخص‌های بیوشیمیایی استفاده شد [۱۵].

شمارش سلول‌های اسپرمتوزوئید

سه میدان دید از مرکز لوله‌های منی‌ساز در هر یک از گروه‌های کنترل و تجربی انتخاب و شمارش سلول‌ها در میدان دید میکروسکوپ نوری به روش Glezerman و همکاران [۱۶] به دست کارشناس با تجربه انجام گرفت. میانگین به‌دست آمده برحسب در صد از کل سلول‌ها بیان شد.

آماده‌سازی بافت‌ها برای تعیین شاخص‌های بیوشیمیایی

بافت‌های جدا شده پس از شستشو با سالیان نرمال و استریل در محلول KCl، ۱/۱۵٪ (با نسبت ۱۰٪ وزن به حجم) با هموژنایزر تقلنی و در مجاورت یخ هموژن گردید. سپس در ۱۳۰۰۰g به مدت ده دقیقه سانتریفیوژ و

محلول رویی برداشت گردید [۱۷]. از این عصاره قسمتی برای سنجش پروتئین تام با روش Lowry [۱۸] و مابقی برای سنجش‌های بیوشیمیایی استفاده گردید.

سنجش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانت

فعالیت سوپراکسید دیسموتاز بر اساس متد Spitz انجام گرفت [۱۹]. در این روش احیای محلول نیتروبلو تترازولیوم (۱۵ میلی مول) حاوی بتاکوپرین سولفات (۰/۳۵ میلی مول) در طی ۱ دقیقه ارزیابی و فعالیت بر حسب واحد بین‌المللی بر میلی‌گرم پروتئین تام گزارش شد. سنجش فعالیت کاتالاز بر اساس روش Beer و همکاران انجام شد. در این روش تجزیه آب اکسیژنه در محلول بافر فسفات $\text{PH}=7/4$ در ۲۴۰ نانومتر با استفاده از دستگاه ارزیابی و منحنی استاندارد با آب اکسیژنه ۰/۰۲ مول استفاده گردید [۲۰]. برای سنجش گلوتاتیون پراکسیداز، محلول واکنش حاوی ۵۰ میلی‌مول تریس ($\text{PH}=7/7$) و ۰/۰۲۵ مول NADPH بوده پس از اضافه شدن ۱۰۰ میکرولیتر نمونه به این محلول، به مدت ۲ دقیقه در 25°C انکوبه و به آن پراکسید هیدروژن اضافه شد. سپس تغییر جذب در ۳۴۰ نانومتر ارزیابی شد [۲۱].

سنجش کامل "عوامل رادیکال اکسیژنی" (ROS)

این سنجش بر اساس روش Doria انجام شد [۲۲]. در عمل ۲۰ میکرولیتر محلول نمونه به محلول حاوی ۲ میکرومول دی‌هیدرو اتیدیوم اضافه شد. این محلول هم چنین حاوی RPMI-۴۶۴۰ به مقدار ۴۰۰ میکرولیتر بود. احیای دی‌هیدرو اتیدیوم با اسپکتروفتومتر در دو طول موج ۴۲۰ و ۶۴۰ نانومتر ارزیابی و نسبت جذب $640/420$ برای سنجش عوامل رادیکال اکسیژنی استفاده شد. مقادیر عوامل رادیکال اکسیژنی در نمونه تیمار به مقادیر عوامل رادیکال اکسیژنی نمونه نرمال به صورت نسبت بیان شد.

ارزیابی مالون دی‌آلدئید و دی‌تیروزین

با دستگاه HPLC بر اساس روش Brid و همکاران مقدار مالون دی‌آلدئید که با تیوباربیتوریک اسید (۰/۰۲۵ مول) ترکیب شد با استفاده از ستون Supelcosil به قطر ۵ میلی‌متر (LC-۱۸) به روش reverse phase اندازه‌گیری شد [۲۳]. دی‌تیروزین نیز با روش reverse phase-HPLC و ستون ODS_2 و به کمک محلول استاندارد از این ماده ارزیابی شد [۲۴].

آنالیز آماری

هر آزمایش بر روی نمونه‌ها سه مرتبه تکرار شد. میانگین مقادیر به‌دست آمده و انحراف معیار آن‌ها محاسبه و به منظور مقایسه نتایج از آزمون ANOVA در نرم افزار آماری SPSS استفاده شد.

نتایج

وزن حیوانات در گروه تیمار ($20/647 \pm 0/424$ گرم) نسبت به گروه شاهد ($20/884 \pm 0/409$ گرم) در سطح $P < 0/05$ کاهش معنی‌دار نشان نداد.

در خصوص بافت بیضه همان‌طور که در جدول ۱ مربوط به خصوصیات کمی این بافت مشاهده می‌شود، وزن و حجم بیضه در گروه تیمار، کاهش معنی‌دار در سطح $P < 0/05$ نسبت به گروه کنترل نشان نداد. بیضه درون کیسه‌ای به نام غلاف کیسموئید قرار گرفته که مقدار زیادی کلاژن دارد. بررسی مقطع میکروسکوپی این غلاف نشان داد که قطر آن در گروه تیمار نسبت به گروه کنترل کاهش داشته است، ولی این کاهش معنی‌دار نبوده است (شکل ۱). بافت همبند در بیضه‌ها بافتی است که لوله‌های منی‌ساز را پشتیبانی می‌کند. در این بافت سلول‌های بیضی شکل بنام سلول‌های بینابینی قرار دارند. این سلول‌ها از نظر تعداد در گروه تیمار کاهش معنی‌دار در سطح $P < 0/01$ نسبت به گروه شاهد داشتند (شکل ۲).

بررسی لوله‌های منی‌ساز (شکل ۳) نشان داد که قطر آن‌ها در سطح $P < 0/01$ در گروه تیمار شده نسبت به گروه شاهد کاهش داشته است. هنگامی که اولین گروه سلول‌های اسپرماتوگونی، یعنی گروه A که رنگ‌پذیری متوسط داشتند بررسی شدند تعداد آن‌ها در گروه تیمار در سطح $P < 0/01$ نسبت به گروه شاهد کاهش معنی‌دار داشت.

سلول‌های اسپرماتوگونی نوع B، سلول‌های اسپرماتوسیت اولیه، سلول‌های اسپرماتید و نهایتاً سلول‌های اسپرماتوزوئید نیز در گروه تیمار شده در سطح $P < 0/001$ نسبت به گروه شاهد کاهش معنی‌دار نشان دادند (شکل ۴). بررسی سلول‌های سرتولی نشان داد که تعداد آن‌ها نیز در گروه تیمار شده در سطح $P < 0/05$ نسبت به گروه شاهد کاهش معنی‌دار دارد.

در خصوص کبد، بررسی مقاطع میکروسکوپی کبد (اشکال ۵ و ۶) نشان داد که تعداد سلول‌های هپاتوسیت، سلول‌های کوپفر، سینوزوئیدها، قطر طناب‌های هپاتوسیتی، و ابعاد فضای پورتال در گروه تیمار شده در مقایسه با گروه کنترل تفاوت معنی‌داری ندارند.

سطح فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانت، غلظت بیومارکرهای تخریب اکسیداتیو لیپید و پروتئین و نسبت کل "عوامل رادیکال اکسیژنی" در خون محیطی موش‌ها پس از ۲۴ ساعت از دریافت ماده شیمیایی در جدول ۲ نشان داده شده‌اند.

مقدار LD ۵۰ میکروگرم بر کیلوگرم وزن بدن تعیین گردید. همان‌طور که در جدول ۲ مشاهده می‌شود، هیچ یک از آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانت افزایش معنی‌داری در غلظت ۲۵۰۰ میکروگرم بر کیلوگرم وزن بدن نسبت به کنترل نشان نداد. از سوی دیگر با افزایش غلظت‌های کاربردی هر یک از بیومارکرهای مالون

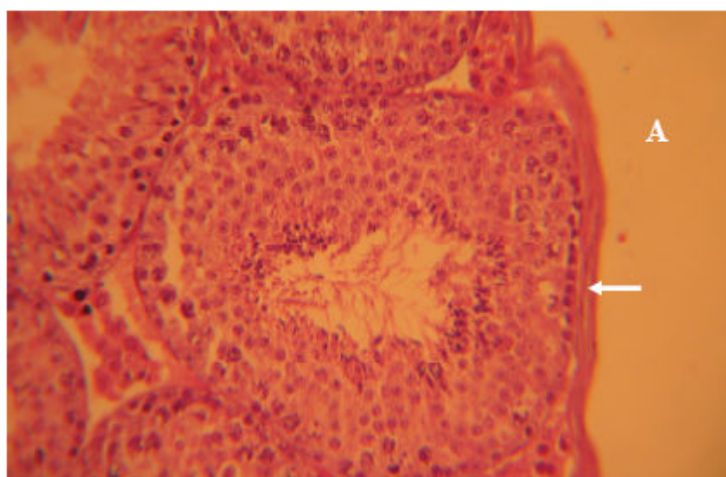
دی‌آلدئید و دی‌تیروزین روند افزایشی چشمگیری در خون نسبت به شاهد نشان دادند به‌طوری که در غلظت ۱۵۰۰ میکروگرم بر کیلوگرم وزن بدن و غلظت‌های افزون‌تر از ماده مصرفی، هر دو عامل مورد نظر به نحو معنی‌داری نسبت به کنترل افزایش داشته‌اند و در غلظت ۲۵۰۰ این افزایش معنی‌دار به بیش‌ترین مقدار خود در بین غلظت‌های تزریقی رسید. نظر به مشارکت "عوامل رادیکال اکسیژنی" در تخریب ماکرومولکول‌های پروتئین و لیپیدها، سنجش تام این عوامل نسبت به گروه شاهد در این جدول نشان داد که از غلظت ۱۰۰ میکروگرم بر کیلوگرم وزن بدن به بعد این شاخص افزایش یافته و در غلظت ۲۵۰۰ به حدود ۳-۴ برابر مقدار نرمال رسید.

مقادیر همین شاخص‌های بیوشیمیایی خون محیطی موش‌ها که غلظت‌های کمتر از غلظت LD_{۵۰} را دریافت کردند پس از یک هفته در جدول ۳ مشاهده می‌شود. بر این اساس فعالیت هر یک از آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانت در روندی وابسته به غلظت ترکیب مورد استفاده رو به افزایش گذاشت به‌طوری‌که در غلظت ۱۰۰۰ و ۱۵۰۰ میکروگرم بر کیلوگرم وزن بدن به‌طور معنی‌دار نسبت به گروه شاهد افزایش نشان داد. افزایش مشاهده شده در سطح فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانت در غلظت ۱۵۰۰ میکروگرم بر کیلوگرم وزن بدن نسبت به غلظت ۱۰۰۰ میکروگرم بر کیلوگرم در گروه تیمار شده معنی‌دار نبود. از سوی دیگر، سنجش "عوامل رادیکال اکسیژنی" نشان داد که مقادیر کامل آن‌ها در غلظت‌های کاربردی از ماده شیمیایی حتی تا غلظت ۱۵۰۰ میکروگرم بر کیلوگرم وزن بدن نسبت به گروه شاهد تغییری داشتند که معنی‌دار نبود. در این‌جا نیز سطح مالون دی‌آلدئید و دی‌تیروزین (بیومارکرهای تخریب اکسیداتیو) افزایش معنی‌دار در هر یک از غلظت‌های تزریقی در گروه تیمار نسبت به گروه کنترل نشان داد. افزایش در مقدار آن‌ها تا غلظت ۱۰۰۰ میکروگرم بر کیلوگرم وزن بدن شاخص و از آن به بعد از شدت آن کاسته شده است به‌طوری‌که اختلاف بین غلظت ۱۵۰۰ تا ۱۰۰۰ میکروگرم بر کیلوگرم وزن بدن معنی‌دار نبوده است.

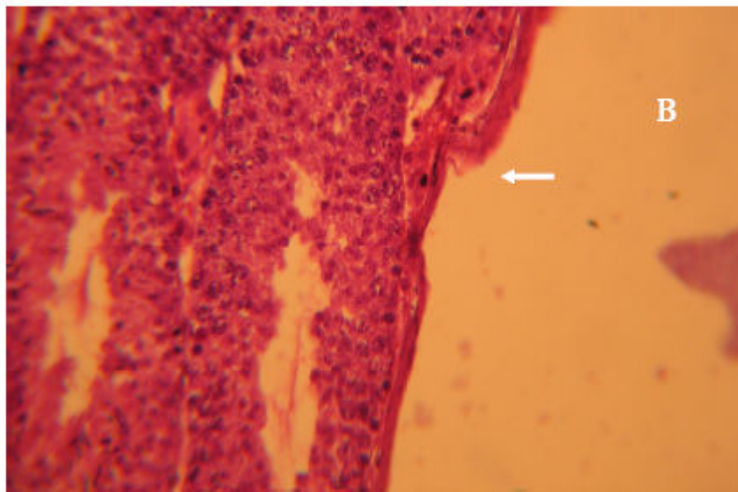
جدول ۴ مقادیر شاخص‌های بیوشیمیایی را در بافت بیضه موش‌ها پس از یک هفته دریافت غلظت‌های مختلف از ماده شیمیایی تا غلظت ۱۵۰۰ میکروگرم بر کیلوگرم وزن بدن نشان می‌دهد. بر این اساس، فعالیت هر یک از آنزیم‌های مورد نظر در بافت بیضه در روند وابسته به غلظت ماده شیمیایی رو به افزایش گذاشت. فعالیت آنزیم‌ها تا غلظت ۱۰۰۰ میکروگرم بر کیلوگرم وزن بدن به شدت فعالیتشان افزایش یافت. در غلظت ۱۵۰۰ میکروگرم بر کیلوگرم وزن بدن افزایش فعالیت آنزیم‌ها خفیف‌تر شد. به‌طوری‌که تفاوت فعالیت آنزیم‌ها بین دو غلظت ۱۵۰۰ تا ۱۰۰۰ میکروگرم بر کیلوگرم وزن بدن معنی‌دار نبود. مقادیر مربوط به دو شاخص مالون دی‌آلدئید و دی‌تیروزین نیز در غلظت ۱۵۰۰ میکروگرم بر کیلوگرم وزن بدن از ماده شیمیایی به‌کار رفته به‌طور معنی‌دار نسبت به شاهد افزایش یافتند و به حداکثر مقدار خود نسبت به گروه شاهد رسیدند. مقدار

دی‌تیروزین در این غلظت از ماده شیمیایی به‌کار رفته تقریباً به سه برابر دی‌تیروزین در گروه کنترل رسید. مقدار هر یک از دو شاخص مالون دی‌آلدئید و دی‌تیروزین در ۱۵۰۰ نسبت به غلظت ۱۰۰۰ میکروگرم بر کیلوگرم وزن بدن از ماده شیمیایی به‌کار رفته تفاوت معنی‌دار نشان نداد.

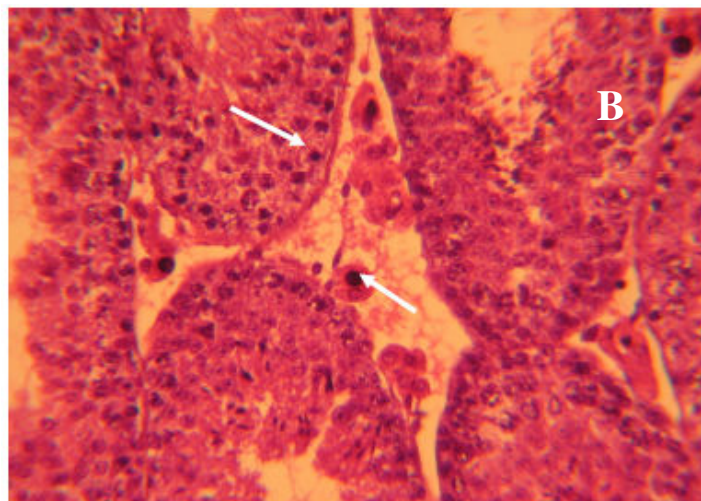
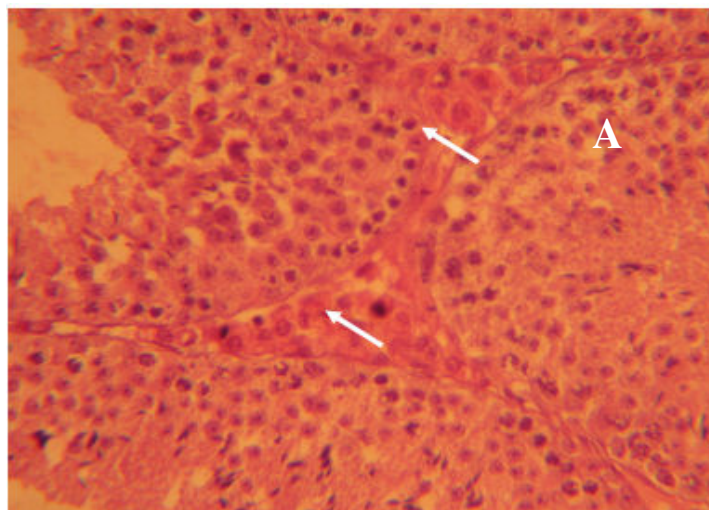
جدول ۵ شاخص‌های بیوشیمیایی را در کبد نشان می‌دهد. سطح فعالیت هر یک از آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانت در بافت کبد در روند وابسته به غلظت ترکیب شیمیایی بررسی شده تا ۱۰۰۰ میکروگرم بر کیلوگرم وزن بدن افزایش یافت. در ۱۰۰۰ میکروگرم بر کیلوگرم وزن بدن از ترکیب شیمیایی بررسی شده، فعالیت هر یک از آنزیم‌ها اختلاف معنی‌داری نسبت به گروه شاهد نشان داد. در غلظت ۱۵۰۰ میکروگرم بر کیلوگرم وزن بدن، فعالیت دو آنزیم سوپر اکسید دیسموتاز و کاتالاز نسبت به فعالیت آن‌ها در ۱۰۰۰ میکروگرم بر کیلوگرم وزن بدن کاهش یافت. فعالیت آنزیم گلوکوتاتیون پراکسیداز در غلظت ۱۵۰۰ میکروگرم بر کیلوگرم وزن بدن از ترکیب شیمیایی بررسی شده نسبت به فعالیت آن در ۱۰۰۰ میکروگرم بر کیلوگرم وزن بدن افزایش نشان داد. با این حال اختلاف فعالیت هر یک از این سه آنزیم در غلظت ۱۵۰۰ نسبت به ۱۰۰۰ میکروگرم بر کیلوگرم وزن بدن از ترکیب شیمیایی بررسی شده معنی‌دار نبود. مقادیر مالون دی‌آلدئید و دی‌تیروزین در دامنه غلظت ترکیب شیمیایی بررسی شده حتی در ۱۵۰۰ میکروگرم بر کیلوگرم وزن بدن نسبت به گروه شاهد تغییرات معنی‌دار نشان ندادند.



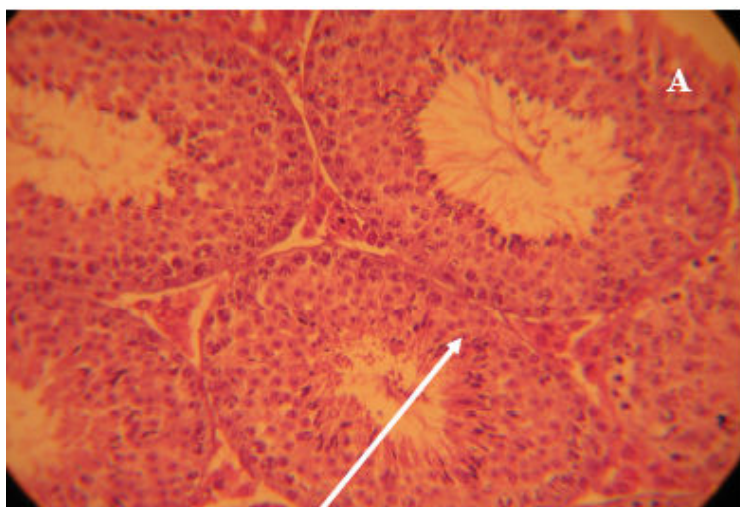
شکل ۱. فتومیکروگراف از غلاف سفید بیضه در گروه‌های کنترل (شکل A) و تجربی تیمار شده با ۱۵۰۰ میکروگرم بر کیلوگرم وزن بدن از یک هفته (شکل B)، رنگ‌آمیزی شده با آنوزین-هماتوکسیلین. به کاهش قطر غلاف سفید در گروه تجربی نسبت به گروه کنترل توجه شود (بزرگ‌نمایی $\times 400$)



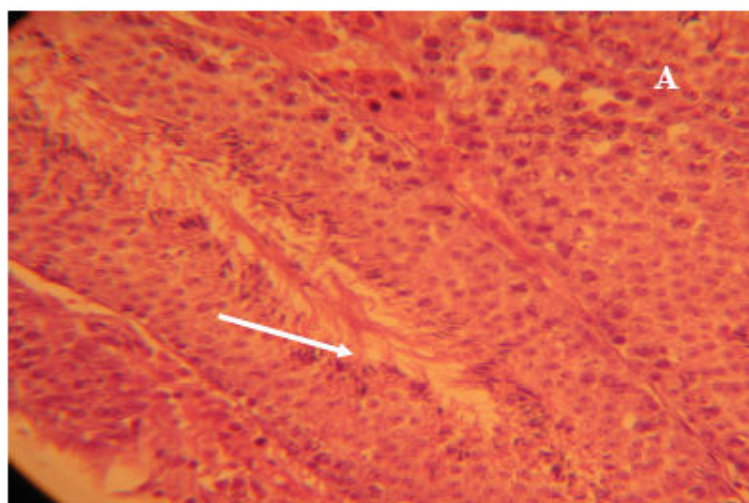
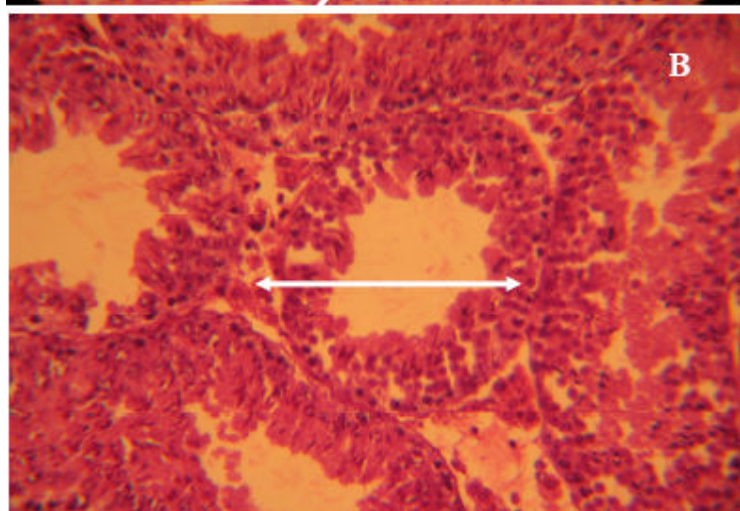
شکل ۱. فتومیکروگراف از غلاف سفید بیضه در گروه‌های کنترل (شکل A) و تجربی تیمار شده با ۱۵۰۰ میکروگرم بر کیلوگرم وزن بدن بعد از یک هفته (شکل B)، رنگ‌آمیزی شده با آنوزین-هماتوکسیلین. به کاهش قطر غلاف سفید در گروه تجربی نسبت به گروه کنترل توجه شود (بزرگ‌نمایی $\times 400$)



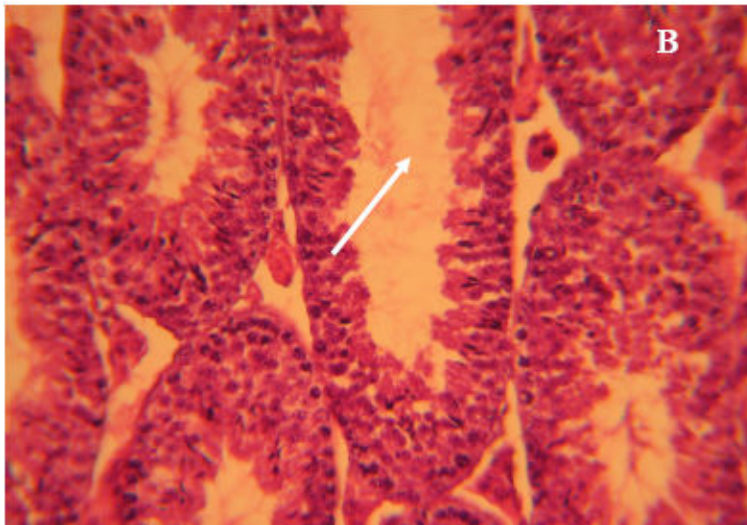
شکل ۲. فتومیکروگراف از سلول‌های بینابینی گروه‌های کنترل (شکل A) و تجربی تیمار شده با ۱۵۰۰ میکروگرم بر کیلوگرم وزن بدن بعد از یک هفته (شکل B)، رنگ‌آمیزی شده با آنوزین-هماتوکسیلین. به تعداد سلول‌های بینابینی در گروه تجربی نسبت به گروه کنترل توجه شود (بزرگ‌نمایی $\times 400$)



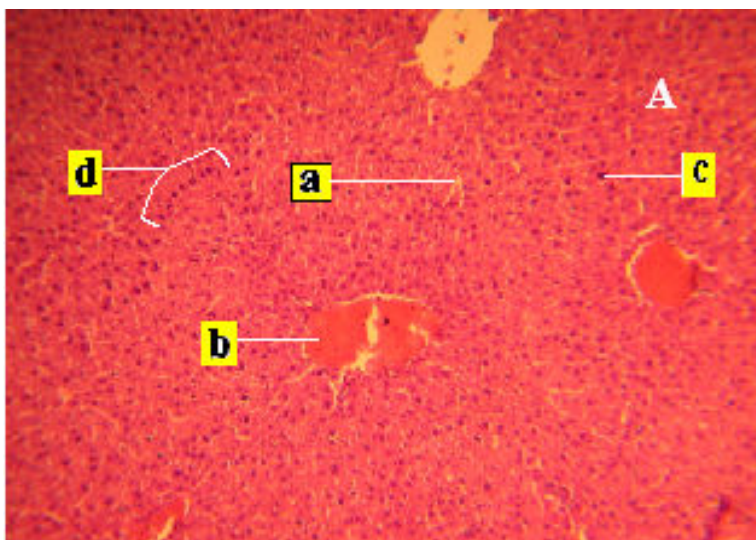
شکل ۳. فتومیکروگراف از لوله‌های منی‌ساز در گروه‌های کنترل (شکل A) و تجربی تیمار شده با ۱۵۰۰ میکروگرم بر کیلوگرم وزن بدن بعد از یک هفته (شکل B)، رنگ آمیزی شده با آنوزین-هماتوکسیلین. به قطر لوله‌های منی‌ساز در گروه تجربی نسبت به گروه کنترل توجه شود (بزرگنمایی $\times 100$)



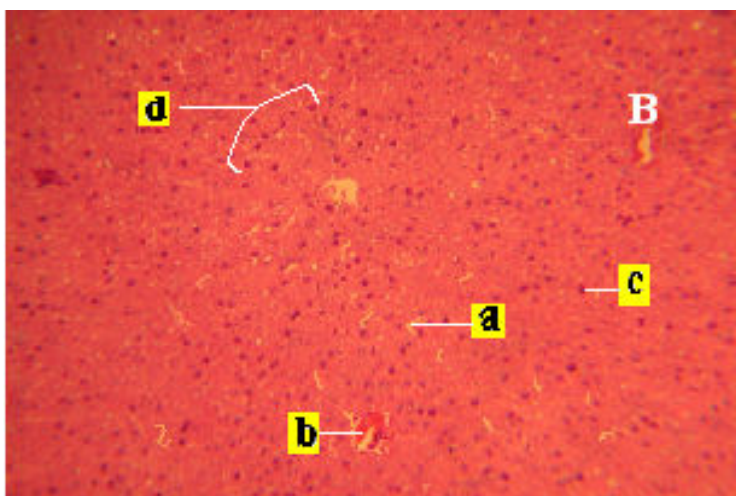
شکل ۴



شکل ۴. فتومیکروگراف از سلول‌های اسپرماتوزوئید در گروه‌های کنترل (شکل A) و تجربی تیمار شده با ۱۵۰۰ میکروگرم بر کیلوگرم وزن بدن بعد از یک هفته (شکل B)، رنگ‌آمیزی شده با آنوزین-هماتوکسیلین. به کاهش تعداد سلول‌های اسپرماتوزوئید در گروه تجربی نسبت به گروه کنترل توجه شود (بزرگنمایی $\times 400$).

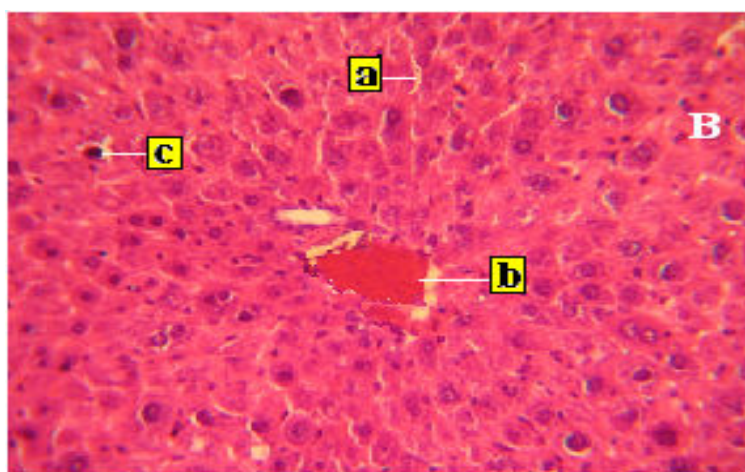


شکل ۵. فتومیکروگراف از فضا‌های سینوزوئید (a)، پورتال (b)، سلول‌های هپاتوسیت (c) و طناب‌های هپاتوسیتی (d) کبد در گروه‌های کنترل (شکل A) و تجربی تیمار شده با ۱۵۰۰ میکروگرم بر کیلوگرم وزن بدن بعد از یک هفته (شکل B)، رنگ‌آمیزی شده با آنوزین-هماتوکسیلین (بزرگنمایی $\times 100$).





شکل ۶. فتومیکروگراف از فضاهای سینوزوئید (a)، پورتال (b)، سلول‌های کوپفر (c) در کبد گروه‌های کنترل (شکل A) و تجربی تیمار شده با ۱۵۰۰ میکروگرم بر کیلوگرم وزن بدن بعد از یک هفته (شکل B)، رنگ‌آمیزی شده با آنوزین-هماتوکسیلین. (بزرگ‌نمایی $\times 400$)



جدول ۱. کمیت‌های سلولی بافتی بیضه‌های موش‌های گروه کنترل و گروه تیمار شده با ۱۵۰۰ میکروگرم بر کیلوگرم وزن بدن از کرون اتر بعد از یک هفته.*

شاخص	گروه کنترل	گروه تیمار شده	تفاوت آماری
وزن بیضه‌ها (گرم)	0.120 ± 0.004	0.101 ± 0.002	$P < 0.05$ در سطح
حجم بیضه‌ها (سانتی‌متر مکعب)	0.207 ± 0.003	0.192 ± 0.003	$P < 0.05$ در سطح
قطر غلاف سفید (میکرون)	11.681 ± 0.259	11.317 ± 0.311	=
تعداد سلول‌های لیدیگ	58.600 ± 1.222	48.533 ± 0.698	$P < 0.01$ در سطح
قطر لوله‌های منی‌ساز (میکرون)	177.097 ± 1.139	171.368 ± 1.459	$P < 0.01$ در سطح
تعداد سلول‌های اسپرماتوگونی A	6.534 ± 0.336	4.800 ± 0.470	$P < 0.01$ در سطح
تعداد سلول‌های اسپرماتوگونی B	55.733 ± 1.779	41.533 ± 1.450	$P < 0.01$ در سطح
اسپرماتوسیت اولیه	66.8 ± 1.586	41.525 ± 1.206	$P < 0.01$ در سطح
اسپرماتید	109.40 ± 1.664	98.933 ± 1.967	$P < 0.01$ در سطح
اسپرماتوزوئید	76.933 ± 0.938	63.064 ± 0.923	$P < 0.01$ در سطح
سلول‌های سرتولی	12.733 ± 0.693	10.064 ± 0.752	$P < 0.05$ در سطح

* مقادیر بر حسب میانگین $\pm$ انحراف معیارند.

جدول ۲. فعالیت آنزیم‌های آنتی اکسیدانت و سطح بیو مارکرهاي تخریب اکسیداتیو لیپیدی و پروتئینی خون محیطی موش بعد از ۲۴ ساعت تزریق صفاقی از غلظت‌های مختلف کرون اتر.*

شاخص بیوشیمیایی	غلظت کرون اتر (میکرو گرم بر کیلوگرم وزن بدن)					
	۰	۵۰۰	۱۰۰۰	۱۵۰۰	۲۰۰۰	۲۵۰۰
سوپر اکسید دیسموتاز (واحد بر میلی‌گرم پروتئین)	$18/15 \pm 3/72$	$16/38 \pm 2/76$	$19/27 \pm 2/54$	$17/49 \pm 3/86$	$23/40 \pm 3/86$	$24/62 \pm 4/38$
کاتالاز (واحد بر میلی‌گرم پروتئین)	$7/31 \pm 1/16$	$8/10 \pm 1/23$	$6/88 \pm 1/07$	$9/39 \pm 1/48$	$7/91 \pm 1/30$	$10/15 \pm 1/89$
گلوتاتیون پر اکسیداز (نانومول بر میلی‌گرم پروتئین)	$23/46 \pm 4/21$	$20/83 \pm 3/86$	$24/15 \pm 4/02$	$19/05 \pm 2/57$	$22/16 \pm 2/12$	$25/07 \pm 2/83$
مالون دی آلدنید (نانومول بر ۱۰۰ میلی‌گرم پروتئین)	$36/15 \pm 4/10$	$38/05 \pm 3/16$	$43/20 \pm 4/05$	$58/45 \pm 4/73$	$69/70 \pm 5/04$	$91/42 \pm 6/34$
دی تیروزین (نانومول بر ۱۰۰ میلی‌گرم پروتئین)	$5/81 \pm 0/84$	$5/12 \pm 0/71$	$7/43 \pm 1/08$	$9/10 \pm 1/39$	$13/52 \pm 1/70$	$18/63 \pm 2/16$
رادیکال‌های آزاد اکسیژن (نسبت به گروه کنترل)	۱	۱	$1/36 \pm 0/04$	$2/48 \pm 0/18$	$3/12 \pm 0/41$	$3/85 \pm 0/54$

* مقادیر بر حسب میانگین $\pm$ انحراف معیارند.

جدول ۳. فعالیت آنزیم‌های آنتی اکسیدانت و سطح بیو مارکرهاي تخریب اکسیداتیو لیپیدی و پروتئینی خون محیطی بعد از یک هفته تزریق درون صفاقی از غلظت‌های مختلف کرون اتر.*

شاخص بیوشیمیایی	غلظت کرون اتر (میکرو گرم بر کیلوگرم وزن بدن)			
	۰	۵۰۰	۱۰۰۰	۱۵۰۰
سوپر اکسید دیسموتاز (واحد بر میلی‌گرم پروتئین)	$19/22 \pm 2/83$	$24/10 \pm 3/05$	$31/28 \pm 3/22$	$34/52 \pm 3/38$
کاتالاز (واحد بر میلی‌گرم پروتئین)	$7/06 \pm 1/03$	$9/36 \pm 1/44$	$13/74 \pm 2/05$	$14/28 \pm 2/17$
گلوتاتیون پر اکسیداز (نانومول بر میلی‌گرم پروتئین)	$22/15 \pm 3/29$	$28/72 \pm 3/63$	$35/42 \pm 4/10$	$37/10 \pm 4/22$
مالون دی آلدنید (نانومول بر ۱۰۰ میلی‌گرم پروتئین)	$38/72 \pm 5/12$	$47/11 \pm 5/51$	$58/37 \pm 5/62$	$62/15 \pm 6/11$
دی تیروزین (نانومول بر ۱۰۰ میلی‌گرم پروتئین)	$5/54 \pm 0/71$	$7/85 \pm 0/82$	$10/14 \pm 1/04$	$11/32 \pm 1/15$
رادیکال‌های آزاد اکسیژن (نسبت به گروه کنترل)	۱	۱	$1/16 \pm 0/05$	$1/21 \pm 0/14$

* مقادیر بر حسب میانگین $\pm$ انحراف معیارند.

جدول ۴. فعالیت آنزیم‌های آنتی اکسیدانت و سطح بیو مارکرهاي تخریب اکسیداتیو لیپیدی و پروتئینی بافت بیضه موش بعد از یک هفته تزریق درون صفاقي از غلظت‌های مختلف کرون اتر.*

شاخص بیوشیمیایی	غلظت کرون اتر (میکرو گرم بر کیلوگرم وزن بدن)			
	۱۵۰۰	۱۰۰۰	۵۰۰	۰
سوپر اکسید دیسموتاز (واحد بر میلی‌گرم پروتئین)	$190/24 \pm 15/42$	$14/22 \pm 182/71$	$150/31 \pm 12/11$	$138/55 \pm 10/16$
کاتالاز (واحد بر میلی‌گرم پروتئین)	$76/18 \pm 6/82$	$70/23 \pm 6/55$	$44/64 \pm 3/81$	$37/12 \pm 2/94$
گلوتاتیون پر اکسیداز (نانومول بر میلی‌گرم پروتئین)	$80/32 \pm 7/15$	$82/11 \pm 7/60$	$60/85 \pm 5/32$	$55/10 \pm 4/12$
مالون دی‌آلدنید (نانومول بر ۱۰۰ میلی گرم پروتئین)	$123/17 \pm 9/78$	$113/65 \pm 8/40$	$92/10 \pm 8/03$	$81/13 \pm 7/25$
دی‌تیروزین (نانومول بر ۱۰۰ میلی‌گرم پروتئین)	$50/83 \pm 4/56$	$43/15 \pm 4/18$	$2/74 \pm 1/82$	$16/56 \pm 1/03$
رادیکال‌های آزاد اکسیژن (نسبت به گروه کنترل)	۱	۱	$1 \pm 0/07$	۱

* مقادیر بر حسب میانگین $\pm$ انحراف معیارند.

جدول ۵. فعالیت آنزیم‌های آنتی اکسیدانت و سطح بیو مارکرهاي تخریب اکسیداتیو لیپیدی و پروتئینی بافت کبد موش بعد از یک هفته تزریق درون صفاقي از غلظت‌های مختلف کرون اتر.*

شاخص بیوشیمیایی	غلظت کرون اتر (میکرو گرم بر کیلوگرم وزن بدن)			
	۱۵۰۰	۱۰۰۰	۵۰۰	۰
سوپر اکسید دیسموتاز (واحد بر میلی‌گرم پروتئین)	$88/46 \pm 7/51$	$94/52 \pm 8/12$	$67/14 \pm 6/83$	$54/71 \pm 6/51$
کاتالاز (واحد بر میلی‌گرم پروتئین)	$41/63 \pm 3/40$	$43/14 \pm 3/51$	$28/47 \pm 2/15$	$18/12 \pm 1/80$
گلوتاتیون پر اکسیداز (نانو مول بر میلی‌گرم پروتئین)	$71/25 \pm 5/64$	$69/77 \pm 5/23$	$57/31 \pm 4/10$	$31/56 \pm 2/62$
مالون دی‌آلدنید (نانو مول بر ۱۰۰ میلی گرم پروتئین)	$80/11 \pm 7/63$	$78/26 \pm 7/40$	$74/14 \pm 6/11$	$68/24 \pm 5/47$
دی تیروزین (نانو مول بر ۱۰۰ میلی گرم پروتئین)	$16/57 \pm 3/43$	$15/81 \pm 2/28$	$13/46 \pm 2/14$	$12/37 \pm 1/03$
رادیکال‌های آزاد اکسیژن (نسبت به گروه کنترل)	۱	۱	$1 \pm 0/06$	۱

* مقادیر بر حسب میانگین $\pm$ انحراف معیارند.

بحث

هتروماکروسیکلیک بررسی شده در این پژوهش، خود الیگومری ازدی‌اکسان است که واحد بنیادی آن اکسی‌اتیلن است. در این ترکیب گروه‌های شیمیایی همچون سولفوکسید و آمید وجود دارند که بر خصوصیات شیمیایی آن تأثیر می‌گذارند. با توجه به تنوع ساختار این مواد برای بررسی اثرات زیستی و کاربردهای بالینی آن‌ها تلاش زیادی صورت گرفته است: ولی همچنان برای روشن شدن جنبه‌های مختلف اثرات آن‌ها آزمایش‌های گوناگون انجام می‌گیرند.

در پژوهش حاضر ۲۵۰۰ میکروگرم بر کیلوگرم وزن بدن به‌عنوان غلظت LD_{۵۰} تعیین شد. مرگ موجود زنده مربوط به سمیت این ماده شیمیایی است. چنین اثر سمیتی از سایر کرون اترها نیز مشاهده شده، به‌طوری که در پروکاریوت‌ها و یوکاریوت‌ها حتی منجر به مرگ سلول‌های مورد آزمایش شده است. پژوهندگان اعلام کرده‌اند که میزان غلظت برای بروز اثرات سمی، وابسته به نوع جانشینی موجود در حلقه تاجی شکل ماده مصرفی و همچنین به نوع سلول یا حیوان بررسی شده وابسته بوده است [۲۵]، [۲۶]. بررسی منابع، مکانیسم‌های مختلفی را برای ایجاد سمیت نشان داده‌اند که یکی از آن‌ها، اثرات حاصل از افزایش رادیکال‌های آزاد در پاسخ به همین ماده به عنوان ماده گزنوبیوتیک در کشت سلول‌های V79 و مشتقات شبیه به آن در سلول‌های WI38 بوده است [۲۸]، [۲۷]. این مکانیسم از آن جهت حائز اهمیت است که موش به عنوان مدلی مناسب در این گونه تحقیقات، موجودی هوازی بوده و به‌طور طبیعی مقادیر کمی از "رادیکال‌های آزاد اکسیژنی" (Reactive Oxygen Species=ROS) در بدن آن تولید می‌شود.

ماده شیمیایی مورد استفاده در این پژوهش در بخش خارجی ملکول خود ویژگی لیپید دوستی دارد که به آن خصوصیت نفوذپذیری چشم‌گیری در غشاهای زیستی می‌دهد. همچنین داخل ساختار حلقه‌ای آن توانایی جذب یون‌های فلزی دارد. بر این اساس پژوهش گران نشان داده‌اند در رویارویی سلول‌ها با ترکیبات شیمیایی که دارای چنین خصوصیتی هستند احتمال دارد که این ترکیبات با دخالت در فعالیت‌های طبیعی غشا یا شرکت در انتقال یون‌ها، تعادل غلظتی آن‌ها را در دو سوی غشا بر هم زنند و یا با تأثیر غیرمستقیم بر واکنش‌های اکسیداتیو، تعادل طبیعی که بین تولید و تجزیه "رادیکال‌های آزاد اکسیژنی" وجود دارد مختل کنند و از آن به بعد با افزایش میزان رادیکال‌های آزاد و تأثیرات تخریبی بر ماکروملکول‌ها باعث بروز سمیت زیستی گردند [۲۹].

بر این اساس، هدف از پژوهش حاضر پس از مشخص شدن سطح سمیت LD_{۵۰} ماده مورد نظر بررسی این فرضیه است که آیا سمیت مشاهده شده این ماده می‌تواند مربوط به کارکرد تخریبی "رادیکال‌های آزاد اکسیژنی" (ROS) باشد؟ بررسی انجام شده نشان داد که ۲۴ ساعت پس از زمان تزریق ماده شیمیایی، مقدار رادیکال‌های آزاد اکسیژنی در خون موش‌ها در روندی وابسته به غلظت افزایش یافته و در غلظت ۲۵۰۰ میکروگرم بر

کیلوگرم وزن بدن که معادل LD₅₀ است به تقریباً ۴ برابر مقدار طبیعی رسید. مشابه چنین نتیجه‌ای در تحقیقات Stephen و همکاران [۳۰] بیان شده است. در بررسی آنان مکانیسم افزایش و تأثیر رادیکال‌های آزاد اکسیژنی در پاسخ به اثرات مواد شیمیایی بررسی شده و بر اساس آن چگونگی شکل‌گیری پدیده مرگ سلولی بیان شده است. با افزایش غلظت این رادیکال‌های اکسیژنی و رسیدن آن‌ها به بافت‌های بدن، شبکه‌ای از اثرات تخریبی بر ملکول‌های زیستی شکل می‌گیرد که محصولات باقی مانده از این تخریب‌ها به همراه جریان خون در سراسر بدن توزیع می‌شوند. چنین فرایندی نهایتاً منجر به از کار افتادن اندام‌ها و مرگ موجود زنده می‌شود [۳۱]. پدیده‌ای که در پژوهش حاضر در غلظت LD₅₀ مشاهده شد.

مالون دی‌آلدئید و دی‌تیروزین به ترتیب از تخریب لیپیدها و پروتئین‌ها تحت تأثیر رادیکال‌های آزاد اکسیژنی بوجود می‌آیند. در این پژوهش، غلظت بالای این بیومارکرهای تخریب به همراه افزایش رادیکال‌های آزاد اکسیژنی مشاهده شد. این مشاهده خود می‌تواند تأییدی بر مشارکت رادیکال‌های اکسیژنی در وقوع آسیب‌های بافت‌ها باشد [۳۲].

عدم تغییر در سطح فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانت در گروه تیمار شده با ماده شیمیایی در این تحقیق نسبت به گروه شاهد می‌تواند ناشی از سرعت عمل‌کرد و تأثیرات این ماده در القای تولید رادیکال‌های اکسیژنی باشد؛ در حالی که دفاع آنتی‌اکسیدانتی به زمان بیشتری برای فعال شدن نیاز داشته است. دلیل زمان تأخیر در تحقیقات مختلف بررسی شده است و این نتیجه حاصل شده است که برای فعال شدن ژن‌های این آنزیم‌ها وجود مدت زمانی بعد از افزایش در غلظت رادیکال‌های آزاد اکسیژنی ضروری است [۳۳]، [۳۴]، [۱۲].

برای آن‌که اثرات سمی این ماده شیمیایی از نظر بافت‌شناسی نیز بررسی شود، بافت کبد به عنوان مهم‌ترین مرکز متابولیسم مواد شیمیایی و غده بیضه که محل تولید سلول‌های جنسی است انتخاب شدند. موش‌ها با تزریق ماده مورد نظر تا غلظت ۱۵۰۰ میکروگرم بر کیلوگرم وزن بدن توانستند حداقل یک هفته زنده بمانند. بقای این گروه تیمار شده احتمالاً با القای آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانت و فعالیت شاخص و معنی‌دار آن‌ها در خون محیطی مرتبط بوده است. به‌طوری که بررسی نشان داد گروه تیمار شده توانستند در طول مدت یک هفته از افزایش رادیکال‌های آزاد اکسیژنی خون جلوگیری کنند و آن را در پایان این زمان به محدوده گروه کنترل برسانند. این یافته با نتایج تحقیقات James و همکاران [۳۵] و Scott و همکاران [۳۶] مطابقت دارد. آنان اظهار داشتند که افزایش اولیه در غلظت رادیکال‌های آزاد اکسیژنی پس از مدتی به القای سنتز آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانت می‌انجامد و آن نیز منجر به کاهش سطح رادیکال‌های آزاد اکسیژنی می‌گردد. از آنجا که در پایان یک هفته هنوز مقادیر بیومارکرهای تخریب اکسیداتیو در غلظت‌های کاربردی ۱۰۰۰ و ۱۵۰۰ میکروگرم بر کیلوگرم وزن بدن به نحو معنی‌دار بیش از گروه کنترل بوده است؛ به نظر می‌رسد افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانت در حدی

نبوده است که به‌طور کامل مقادیر این بیومارکرها را به محدوده طبیعی برگرداند. از سوی دیگر، انتقال بخشی از این بیومارکرها از بافت‌های مختلف به خون، منبع افزایش دهنده آن‌ها در خون محیطی بوده است. در تأیید این موضوع می‌توان به تحقیقاتی اشاره کرد که در آن‌ها فعالیت فیزیولوژیک اندام‌های مختلف تحت تأثیر مواد شیمیایی منجر به تولید مقادیر مختلفی از بیومارکرها، تخریب اکسیداتیو شده‌اند [۳۷ و ۲۹]. بر این اساس در تحقیق حاضر، بررسی بافت‌شناسی بیضه در حداکثر دوز قابل تحمل موش‌ها برای مدت یک هفته (۱۵۰۰ میکروگرم بر کیلوگرم وزن بدن) کاهش معنی‌دار در حجم غده، تعداد سلول‌های لیدیگ، قطر لوله‌های منی‌ساز، تعداد سلول‌های جنسی و سلول‌های پیش‌ساز آن‌ها را نشان داد. در این بافت، افزایش چشمگیر و معنی‌دار آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانت مشاهده شده است؛ با این حال افزایش فعالیت آن‌ها در حدی نبوده که به‌طور کامل مانع این آسیب‌ها شود. احتمالاً افزایش بیومارکرها، تخریب اکسیداتیو در این بافت نیز ناشی از تأثیرات تخریبی افزایش اولیه رادیکال‌های آزاد اکسیژنی بوده است. هم‌چنین همان‌طور که پیش‌تر گفته شد، با ورود بخشی از این بیومارکرها به جریان خون، به‌طور غیرمستقیم از منابع بالا افزایشدهنده میزان غلظت آن‌ها در خون بوده است. در تأیید این مطالب می‌توان به تحقیقات مشابهی که Aydos و همکاران [۳۸]، Habib و همکاران [۳۹] و Filho و همکاران [۴۰] انجام داده‌اند اشاره کرد که طی آن‌ها نشان دادند پس از القا در تولید رادیکال‌های آزاد اکسیژنی بیضه، متعاقباً مقادیر آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانت افزایش نشان داده‌اند و در پایان به دلیل کمبود واکنش‌های ترمیمی در این بافت مقادیر چشمگیری از بیومارکرها، تخریب اکسیداتیو در حضور آنزیم‌های آنتی‌اکسیداتیو موجود بوده‌اند.

هنگامی که بافت کبد ارزیابی شد، برخلاف بیضه، اثرات نامطلوب مشاهده نگردید. این در حالی است که نه تنها مقادیر فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانت افزایش معنی‌داری در گروه تیمار شده داشته‌اند، بلکه سطح بیومارکرها، تخریب اکسیداتیو نیز در بافت کبد تغییرات عمده‌ای نشان ندادند. بر این اساس، احتمالاً پاسخ آنزیمی به رادیکال‌های آزاد اکسیژنی که به صورت افزایش فعالیت این آنزیم‌ها بروز کرده توانسته است در طی یک هفته از اثرات نامطلوب رادیکال‌های آزاد ایجاد شده جلوگیری کند. از سوی دیگر به دلیل فعالیت چشمگیر بافت کبد به عنوان جایگاه متابولیسم مواد شیمیایی احتمالاً با متابولیسم سریع ماده شیمیایی منجر به کاهش تأثیرات آن نسبت به بافت بیضه شده است. مطلبی که در تحقیقات مختلف در زمینه تأثیر مواد شیمیایی مختلف بر بافت کبد بیان شده است [۴۱]، [۴۲]، [۴۳].

در مجموع این تحقیق نشان داد که ماده شیمیایی بررسی شده توانایی تولید رادیکال‌های آزاد اکسیژنی دارد و از طریق آن به واسطه تخریب اکسیداتیو لیپیدها و پروتئین‌ها، اثرات سمی خود را در غلظت‌های بالا بر بافت‌ها و نهایتاً موش‌های تیمار شده برجای گذاشته است. دخالت و تأثیر این ماکروسیکلک‌ها ممکن است به توانایی

حمل یونی و نفوذپذیری آن در غشاهای سلول که از خصوصیات دیگر ترکیبات مشابه آن است ارتباط داشته باشد. تغییر در ویژگی‌های فسفولیپیدهای غشا بر اثر پراکسیداسیون لیپیدی که شاهد آن افزایش مالون دی‌آلدئید است منجر به از دست دادن ثبات و کارکرد طبیعی آن شده و آن هم منجر به افزایش نفوذپذیری غشا می‌شود که مجموعاً از عوامل مهم مرگ سلولی هستند [۴۴]. از سوی دیگر، فضای داخل حلقه تاجی شکل این ماکروسیکلک امکان اتصال به کلسیم و سدیم را دارد. یون‌هایی که تغییر در تعادل غلظتی آن‌ها در سلول منجر به افزایش تولید رادیکال‌های آزاد اکسیژنی و به دنبال آن بروز سمیت و مرگ سلولی می‌شود [۴۴]، [۴۵]، [۴۶]. نهایتاً اگر چه این تحقیق بخشی از شواهد را برای تأثیر سمی این ترکیب ماکروسیکلک نشان داد، با وجود این بررسی‌های بیش‌تری برای روشن شدن مکانیسم‌های مرتبط با اثرات آن نیاز است.

منابع

1. G. W. Gokel, M. W. Leevy, M. E. Webert, Crown ethers, *Chem. Rev.*, 104 (2004) 2723- 2750.
2. A. Shockravi, T. S. Bavili, Synthesis of new dibenzosulfoxide macrocyclic diamides, *Journal of Inclusion Phenomena Macrocyclic Chem.*, 52 (2005), 223-227.
3. C. J. Pederson, The discovery of crown ethers, *Science.*, 241 (1988) 156-540.
4. A. Shockravi, T. S. Bavili, E. Rostami, A. Yousefi, et al., Synthesis of new dibenzosulfide and dibenzosulfoxide macrocyclic compounds, *Journal of Inclusion Phenomena Macrocyclic Chem.*, 49 (2004) 163-166.
5. K. Gurbanov, A. A. Paperno, Antiischemic properties of crown ethers derivatives, *EKSP Kin. Farmakol.*, 56 (1993) 18-21.
6. M. Mark, M. M. Mcphee, S. M. Kerwin, Synthesis, DNA cleavage and cytotoxicity of a series of bis(propargylic) sulfone crown ethers, *Bioorg. Med. Chem.*, 9 (2001) 2809-2818.
7. L. Z. Loeckie, J. Meerman, N. M. Jan, Biomarkers of free radicals damage application in experimental animals and human, *Free Radicals. Bioi. Med.*, 26 (1999) 202-226.
8. A. Anterio, Biomarkers and their use in occupational medicine, *Scan. J. Work Environ. Health*, 25 (1999) 521-528.
9. B. Hallhvell, J. M. C. Gutteridge, Oxidative stress: adaptation, damage, repair and death. In: Halliwell B., Gutteridge J. M. C., editors. *Free radicals in biology and medicine*. Chapter 4. Third edition. Oxford Scientific Publication, (1989) 247-252.

10. B. Chantal-Capeillere, V. Gausson, Biochemical and spectrophotometric significance of advanced protein products, *Biochemica Biophysica Acta*, 1689 (2004) 91-102.
11. P. Suhel, R. Sheikh, Protein carbonyls: new biomarkers of exposure to oxidative stress-inducing pesticides in freshwater fish *channa punctata* (Bloch). *Environ. Toxicol. Pharmacol.*, 20 (2005) 112-117.
12. T. Kobayashi, J. M. Robinson, H. Seguchi, Identification of intracellular sites of superoxide production in stimulated neutrophils. *J. Cell Sci.*, 111 (1998) 81-91.
13. J. C. Fruchart, P. Duriez, Free radicals and atherosclerosis. In: A. Catherine, E. Rice, H. B. Roy, editors. *Free radical damage and its controls*. Elsevier, (1994) 258-260.
14. M. Kantol, M. Saranen, P. T. Vanha, Selenium and glutathione peroxidase in serum, plasma of men and bulls, *J. Reprod. Fertil.*, 83 (1988) 785-794.
15. C. Dibeyendu, B. C. Matitree, Antioxidant defense status of red blood cells of patients with B-thalassemia and EB- thalassemia. *Clin. Chim. Acta*, 305 (2001) 123-129.
16. M. Glezerman, B. Bartoov, Semen analysis. In: *Infertility. Male and female*. 2nd ed. V. Insler and B. Lunenfeld, Eds., New York, Churchill Livingston, 1993. pp:285-315.
17. A. Ilgazil, C. Sengul, H. Maral, et al., The effects of Thinner inhalation on Superoxide dismutase activities malondialdehyde and glutathione levels in rat lungs. *Clin. Chim. Acta*, 343 (2004) 141-144.
18. O. H. Lowery, N. J. Rosenbrough, A. L. Farr, R. J. Radall, Protein measurement with phenol reagent, *J. Biol. Chem.*, 193 (1951) 265-275.
19. D. R. Spitz, L. W. Oberley, An assay for superoxide dismutase activity in mammalian tissue homogenates, *Anal. Biochem.*, 179 (1989) 8-18.
20. R. F. Beers, I. W. Sizer, A spectrophotometric method for measuring the breakdown of hydrogen peroxide by catalase, *J. Biol. Chem.*, 195 (1952) 133-140.
21. S. D. K. Clair, C. K. Chow, Glutathione peroxidase: activity and steady-state level of mRNA. In: N. A. Punchard, F. J. Kelly, editors. *Free radicals. A practical approach*. New York: oxford University Press, (1996) 227- 240.

22. R. Dorian, H. Morjani, B. Chenais, Free radical production and labile iron pool decrease triggered by subtoxic concentration of aclarubicin in human leukemia cell lines, *Leukemia Research*, 26 (2002) 927-931.
23. B. R. Bird, S. S. O. Hung, M. Hadley, H. H. Draper, Determination of malonaldehyde in biological materials by high-pressure liquid chromatography, *Anal. Biochem.*, 128 (1983) 240- 244.
24. R. Amado, R. Aeschbach, H. Neukom, Dityrosine: in vitro production and characterization, *Methods Enzymol.*, 107 (1984) 377- 388.
25. P. Arenaz, L. Bit ticks, K. Pannell, S. Garcia, Genotoxic potential of crown ethers in *Salmonella typhimurium*, *Mutagenesis*, 4 (1989) 437-438.
26. S. C. Gad, W. J. Conroy, Mc Klevey, R. A Turney, Behavioral and neuropharmacological toxicology of macrocyclic ether 18-crown-6, *Drug Chem., Toxicol.*, 114 (1979) 339-353.
27. M. M. A. Boojar, A. Shockravi, On the cytotoxicity and status of oxidative stress of two novel synthesized tri-aza macrocyclic diamides as studied in the V79 cell lines, *Bioorg. Med. Chem.*, 15 (2007) 3437-3444.
28. M. M. A. Boojar, F. Goodarzi. Cytotoxicity and the levels of oxidative stress parameters in W138 cells following two macrocyclic crown ethers treatment, *Clin. Chem. Acta*, 364 (2006) 321-327.
29. L. Bergendi, L. Belles, M. Ferencik, Chemistry, physiology and pathology of free radicals, *Life Sciences*, 65 (1999) 1865-1874.
30. S. Stephen, Redox-active metal ions, reactive oxygen species and apoptosis, *Free Rad. Bioi. Med.*, 37 (2004) 1921-1942.
31. F. Bice and H. Andera, Role of reactive oxygen species in lung injury and diseases, *Free Rad. Bioi. Med.*, 34 (2003) 1507-1516.
32. R. B. Scott, K. S. Reddy, E. C. Husain, Dose response of ethanol on antioxidant defense system of liver, lung and kidney in rat. *Pathophysiology* 7 (2002) 25-32.
33. L. F. Chery, C. Ling- y, et al., Enhanced Bleomycine-induced pulmonary damage in mice lacking extra cellular Superoxide dismutase, *Free Rad. Bioi. Med.*, 35 (2003) 763-771.

34. Foyouzi N, Berkkanoglu M, Arici A, Kwintkiewicz J, Izquierdo D, Duleba AJ. Effects of oxidants and antioxidants on proliferation of endometrial stromal cells. *Fertility and Sterility* 2004; 82 (supplement 3):1019-1022.
35. B. M. James, C. K. Murali, Clinical uses of nitroxides as superoxide-dismutase mimics. In: J. R. Christopher, editors: *Toxicology of the Human Environment, the Critical Role of Free Radicals*. Liverpool John Moores University, *Taylor and Francis publication*, (2000) 313-316.
36. R. B. Scott, K. S. Reddy, E. C. Husaill, L. P. Schlorff, Dose response of ethanol on antioxidant defense system of liver, lung, and kidney in Rat, *Pathophysiology*, 7 (2000) 25-32.
37. M. Carolina, F. Massimo, C. Venera, et al., Ethanol-induced injury in rat primary cortical astrocytes involves oxidative stress: effect of idebenone. *Neuroscience letters*, 329 (2002) 21-24.
38. K. Aydos, B. Kupeli, T. Soygur, A. Ullsal, E. Erden, O. Tulullay, S. Kupeli Analysis of the relationship between histological alterations and the generation of reactive oxygen species in vasectomized rat testes, *Urology*, 51 (1998) 510- 515.
39. T. Habib, T. Abul, T. Chacko Mathew, A. Fawzi, A. Hilal. M. Hussein Dashti, Antioxidant enzyme level in the testes of cirrhotic rats, *Nutrition*, 18(2002) 56-59.
40. D. W. Filho, A. M. Torres, A. L. B. Bordill, B. Tinia et al., Spermatic cord torsion, reactive oxygen and nitrogen species and ischemia-reperfusion injury, *Molecular Aspects of Medicine*, 25 (2004) 199-210.
41. J. C. Lipscomb, Evaluating the relationship between variance in enzyme expression and toxicant concentration in health risk assessment. *Human and Ecological Risk Assessment*, 10 (2004) 38-55.
42. G. Malgorzata, Induction of hepatic enzyme activity in rat by polycyclic aromatic hydrocarbons, *Toxicology Letters*, 88 (1996) 91-94.
43. R.M Izatt, J.S. Bradshaw, S.A. Nielson, J.D. Lamb Thermodynamic and kinetic data for cation macrocyclic interaction. *Chem Rev* 1985; 85:271-339.

44. K.G. Gurbanov, A.A. Paperno S.A. Bogomaz, Investigation of antiischemic properties and mechanism of action of Azacrown ether derivatives. *Acta Physiol Pharmacol Bulgarica* 1992; 18:27-31.
45. T.I. Daphna, S. Michaela, K. Yoel, A. Irit Stimulation of neutrophils by pernylcysteine analogs; Ca^{2+} release and influx. *Biochem Biophys Acta* 1999; 1451:187-195.
46. J.I. Goldhaber Free radicals enhance $\text{Na}^+/\text{Ca}^{2+}$ exchange in ventricular myocytes. *Am J Physiol* 1996; 271:H823-H833.