الأكسدة ومضادات الأكسدة في الخلايا الحية

تأليف

الأستاذ المساعد

د. لؤي عبد علي الهلالي

اليازوري

بسم الله الرحمن الرحيم

المقدمة

الحمد لله الذي رفع العلم برفعة الذين اوتوه، فقال عز وجل ﴿يَرْفَعِ ٱللَّهُ ٱلَّذِينَ ءَامَنُواْ مِنكُمْ وَٱلَّذِينَ أُوتُواْ ٱلْعِلْمَ دَرَجَٰتٍ﴾ (سورة المجادلة اية ١١) وجعل العلم نوراً وأرسل محمد صلى الله عليه وسلم معلماً ومبشراً ونذيراً. فأزال به الغمة وانار به العقول. ولا شك ان طلب العلم فريضة على كل انسان.

من المعلوم ان الانسان سعى وما يزال يبذل الجهد الجهيد لمحاولة استجلاء حقيقة الكثير من الظواهر الحيوية والمركبات الكيميائية الموجهة لنشاطه واستمرار حياته وخاصة تلك المتعلقة بالفعاليات الحياتية الأساسية ومن تلك المركبات التي تدخل في أداء فعاليته هي انتاج مركبات الأكسدة وكل ما يتعلق بها والمواد الدفاعية التي تعمل ضدها وهي مضادات الأكسدة فلقد جند العديد من المراكز البحثية في العالم الجزء الكبير من نشاطاتها العلمية لدراسة كل ما يتعلق بالأكسدة ومضادات الأكسدة لما قد تسببه من اساس في استمرار حياة الكائن الحي وديمومته بالصورة المطلوبة ولهذا جاءت فكرة معرفة هذا العالم من الأكسدة ومضادات الأكسدة في الخلايا الحية.

اذ اشارت العديد من الابحاث والدراسات المستفيضة الى ان اغلب الامراض التي تصيب الانسان يمكن ان ترجح سببها هو عن طريق الأكسدة التي تحدث في الجسم، ولهذا في الآونة الاخير اتجهت العديد من الابحاث نحو علم تفاعلات الأكسدة والاختزال التي تجري داخل الخلايا الحية وخارجها لمعرفة ماهية هذه تفاعلات الأكسدة وما المركبات الناتجة عن تلك التفاعلات وما هي المواد التي تكافح ضد تفاعلاتها للقضاء عليها وهي مضادات الأكسدة، اذ لا تخلو أي دراسة من الدراسات الحالية من

فهرس المحتويات

الفصل الاول: الأكسدة *The Oxidants* **٥**

المقدمة: ٥

أنواع مركبات الأكسدة ٧

أمثلـة لتوضيح مفهوم الأكسـدة من خلال بعض عمليات الأكسـدة داخل او خارج جسم الكائن الحي ٨

الأوكسجين **١٣**

طبيعة الأوكسجين وتفاعلاته التأكسدية ١٣

الجذور الحرة ***Free radicals*** ١٥

تفاعلات مركبات الأكسدة الحاوية على الجذور الحرة وغير الحاوية عليها ١٨

عوامل تكوين الجذور الحرة ٢٠

أستقرارية الجذور الحرة ٢٣

تفاعلات الجذور الحرة ٢٤

مراحل تفاعلات الجذور الحرة ٢٦

١- مرحلة البدء ***Initiation*** ٢٦

٢- مرحلة الانتشار ***Propagation*** ٢٦

٣- مرحلة الانتهاء ***Termination*** ٢٧

مضار الجذور الحرة بشكل عام: ٢٧

فوائد الجذور الحرة ٢٩

قياس الجذور الحرة بشكل مباشر او عن طريق تأثيراتها بشكل غير مباشر: ٣٠

١. قياس تأثيرات الجذور الحرة على أكسدة البروتين: ٣٠

٢.قياس نواتج عملية بيروكسيدة الدهن: ٣٠
الفصل الثاني: مصادر مركبات الأكسدة..... ٣٣
المقدمة: ٣٣
المصادر الفيزيائية لانتاج مركبات الأكسدة ٣٥
١. الاشعة فوق البنفسجية ٣٦
٢. الاشعة المتأينة ٣٧
الأشعة السينية وأشعة كاما ٣٩
المصادر الطبيعية لتكوين مركبات الأكسدة في الكائن الحي..... ٤٠
١. تكوين مركبات الأكسدة من خلال عملية البلعمة والالتهابات ٤٠
٢. المسار الايضي لايكوساينويد ٤٢
٣. تكوين جذر أوكسيد النيتريك..... ٤٣
٤. تكوين جذر سوبر أوكسيد السالب من مرافق إنزيم *Q*..... ٤٤
٥. إنزيمات تكوين مركبات الأكسدة خلال تفاعلاتها مثل إنزيمات الأوكسيديز *Oxidase*والأوكسجينيز *Oxygenases* والبيروكسيديز *Peroxidases* ... ٤٧
امثلة لبعض الانزيمات التي تكون مركبات الأكسدة ٤٨
٥ , ١. إنزيم مونوامين أوكسيديز *Monoamine oxidase* ٤٨
٥ , ٢. إنزيم زانثين أوكسيديز *Xanthine oxidase*..... ٥٠
٥ , ٣. إنزيم *NADPH* أوكسيديز *NADPH oxidase*..... ٥٠
٥ , ٤. إنزيمات أوكسيد النيتريك سنثيز *Nitric oxide synthases*..... ٥١
٥ , ٥. إنزيمات اللايبوأوكسيجنيز *Lipoxygenases*..... ٥٢
٥ , ٦. إنزيمات بولي امين أوكسيديز *Polyamine oxidase*..... ٥٤

٥,٧. إنزيم اللاكتوبيروكسيديز *Lactoperoxidase* ٥٤
٥,٨. إنزيم المايلوبيروكسيديز *Myloperoxidase* ٥٦
٥,٩. إنزيم الفا كيتوكلوتاريت ديهيدروجنيز *α–keto glutarate dehydrogenase* ٥٨
٦. مساهمة بعض الهورمونات في انتاج مركبات الأكسدة: ٥٩
٦,١. هورمون الإنجيوتنسين *II* (*Angiotensin II*) ٦٠
٦,٢. الببتيد الأذيني المدر للصوديوم *Atrial natriuretic peptide* ٦٢
٧. العناصر المعدنية كعوامل مساعدة لانتاج مركبات الأكسدة ٦٤
٨. سمية الأدوية *Drug toxicity* ٦٦
٩. التدخين *Smoking* ٦٩
١٠. فعالية بعض مضادات الأكسدة كبوادئ لعملية الأكسدة ٧٠
١١. التمارين الرياضية *Physical exercise* ٧٢
١٢. المضافات الغذائية ٧٤
١٣. طرائق اعداد الطعام ٧٦
١٣,١. العوامل المؤثرة على عملية أكسدة الدهون في الغذاء: ٧٨
١٣,٢ – الإنزيمات التأكسدية المشاركة في عملية أكسدة الغذاء وتلفه ٨٠
١٤. التفاعلات البنية ٨١
١٤,١. التفاعلات البنية غير الانزيمية ٨١
تفاعل ميلارد (التفاعلات البنية) *Maillard reaction* ٨٢
١٤,٢– التفاعلات البنية الانزيمية ٨٣
١٥. نوعية الغذاء المتناول اذا كان نباتي او حيواني ٨٣

١٦. التلوث *Pollution* ٨٤

١٧. فعالية بعض البروتينات الهيمية لبدء عملية الأكسدة ٨٧

١٨. استخدام العلاج الاشعاعي ضد الامراض المختلفة..... ٨٨

١٩. العوامل المساعدة لتفاعلات الأكسدة والاختزال غير المعدنية *Non-metal*..... ٨٨

الفصل الثالث: ميكانيكيات مهاجمة مركبات الأكسدة ضد مكونات الكيميائية الحياتية... ٨٩

١. مهاجمة الدهون..... ٨٩

١ , ١. أكسدة بعض الأحماض الدهنية غير المشبعة ٩٢

I.عملية بيروكسيدة حامض اللينوليك *Linoleic acid* بفعل جذر بيروكسي الألكيل:..... ٩٣

II. أكسدة حامض الأركيدونيك: ٩٥

١ , ٢. العوامل المؤثرة على عملية بيروكسيدة الدهن ٩٥

١ , ٣. قياس مؤشرات حدوث عملية بيروكسيدة الدهن ٩٨

١ , ٤. نواتج عملية بيروكسيدة الدهن ٩٨

١. الالديهايدات:..... ٩٨

أ- المالونداياالديهايد *Malondialdehyde (MDA)*: ٩٩

ب- ٤- هيدروكسي نونينال *4-hydroxynonenal*:..... ١٠١

٢.الأيزوبروستانات *The isoprostanes* ١٠٢

٢ , ٥. تكوين بيروكسيدة الدهن بواسطة الإنزيمات ١٠٣

٢ , ٥ , ١. ميكانيكية إنزيم اللايبوأوكسجينيز في عملية الأكسدة: ١٠٣

٢ , ٦. التفاعلات الترابطية لنواتج بيروكسيد الدهن مع البروتينات: ١٠٤

٣. عملية أكسدة الكوليسترول *Cholesterol oxidation*..... ١٠٧
أ. نواتج الأكسدة الذاتية: ١٠٩
ب- نواتج الأكسدة الضوئية: ١٠٩
جـ- نواتج الأكسدة الإنزيمية: ١١٠
٤. مهاجمة البروتينات..... ١١٢
٤, ١. ميكانيكيات أكسدة البروتين..... ١١٣
٤, ٢. انشطار الاصرة الببتيدية ١١٥
٤, ٣. أكسدة الأحماض الأمينية في السلسلة الببتيدية الجانبية ١١٧
٤, ٤. تكوين الارتباطات بين البروتينات *Protein –protein cross linkage*: ... ١٢٢
٥. مهاجمة الأحماض النووية ومكوناتها ١٢٤
التفاعلات التأكسدية التي تهاجم القواعد النيتروجينية او الأحماض النووية١٢٦
٦. مهاجمة الكاربوهيدرات *Carbohydrate* ١٣٤
٥, ١. تحطم الرايبوز والديوكسي رايبوز *Ribose and deoxyribose damage*..... ١٣٥
أمثلة لتأثير بعض مركبات الأكسدة الحاوية وغير حاوية على الجذور الحرة . ١٣٦
I- تأثير الهايبوكلوروس على مركبات الكيمياء الحياتية ١٣٦
١. تفاعله مع البروتينات الحاوية على مجموعة الثايول ١٣٦
٢. تفاعله مع الحامض النووي الـ *DNA* والنيوكليوتيدات..... ١٣٦
٣. تفاعله مع الدهون ١٣٧
٤. تثبيطه لعملية تكرار الـ *DNA* ١٣٧
٥. حذف النيوكليوتيدات الحاوية على الادنين *Adenine nucleotides*.... ١٣٨

٦. تثبيطه لعملية أكسدة الكلوكوز..... ١٣٨
٧. فتح السلاسل المطوية للبروتين وتجمعها *Protein unfolding and aggregation*..... ١٣٨
II- تأثير الاوزون على مركبات الكيمياء الحياتية..... ١٣٨
III- تأثير بيروكسي نيتريت على مركبات الكيمياء الحياتية..... ١٤٢
١. البروتينات: ١٤٢
أ. التفاعل مع مركز المعادن للمركبات البروتينية: ١٤٢
ب- التفاعلات مع الأحماض الأمينية:..... ١٤٢
I- أكسدة السستين *Cysteine oxidation*..... ١٤٢
II- نيترة التايروسين *Tyrosine nitration* ١٤٣
III- أكسدة المثيونين *Methionine oxidation*..... ١٤٣
٢. الدهون..... ١٤٤
٣. الأحماض النووية ١٤٥
الفصل الرابع: الأصناف الأوكسجين الفعالة ١٤٧
المقدمة: ١٤٧
المصادر الرئيسة لأصناف الأوكسجين الفعالة..... ١٤٨
خواص أصناف الأوكسجين الفعالة ١٥١
١. جذر سوبر أوكسيد السالب *Superoxide anion radicals*..... ١٥١
٢. جذر الهيدروكسيل *Hydroxyl radical*..... ١٥٤
٣. جذر الأوكسي ألكيل *Oxyalkyl rafical*..... ١٥٥
٤. جذر البيروكسي ألكيل *Peroxy alkyl radical*..... ١٥٦

٥. جذر الهيدروبيروكسيد *Hydroperoxyl radical* ١٥٧
٦. الأوكسجين المنفرد *Singlet oxygen* ١٥٨
٧. بيروكسيد الهيدروجين *Hydrogen peroxide* ١٦٥
٨. حامض الهايبوكلوروس *Hypochlorous acid (HOCl)* ١٦٨
٩. الأوزون *Ozone* ١٧٠
الوسائل الدفاعية في الجسم ضد الاوزون..... ١٧٢
الفصل الخامس: الأصناف النيتروجين الفعالة..... **١٧٧**
المقدمة: ١٧٧
١. جذر أوكسيد النيتريك ١٧٨
١ , ٢. إنزيمات أوكسيد النيتريك سنثيز *Nitric oxide synthases (NOS)* .. ١٧٩
١. إنزيم أوكسيد نيتريك سنثيز الطلائية *Endothelial NOS*:..... ١٧٩
٢. إنزيم أوكسيد نيتريك سنثيز الحث *Inducible NOS*: ١٧٩
٣. إنزيم أوكسيد نيتريك سنثيز العصبية *Neuronal NOS*: ١٨٠
١ , ٣. الوظائف الحيوية لجذر أوكسيد النيتريك ١٨٠
١ , ٣ , ١. ميكانيكية عمل جذر أوكسيد النيتريك ١٨٢
٢. اتجاهات جذر أوكسيد النيتريك في الجسم ١٨٣
٣. استخدام أوكسيد النيتريك في العلاج الدوائي..... ١٨٤
المحافظة على مستوى جذر أوكسيد النيتريك ضمن التوفر الحيوي ١٨٥
٤. سمية جذر أوكسيد النيتريك ١٨٥
٤ , ١. التأثير المباشر لجذر أوكسيد النيتريك..... ١٨٦
٤ , ٢. التأثير غير المباشر لجذر أوكسيد النيتريك ١٨٨

١. مهاجمة الحامض النووي الـ *DNA*: ١٨٩
٢. تأثيرات جذر أوكسيد النيتريك على المايتوكوندريا: ١٨٩
٥. بيروكسي نيتريت..... ١٩٠
٦. حامض النيتروز..... ١٩٣
٧. جذر ثنائي أوكسيد النيتروجين ١٩٣
٨. نيتريت ونيترات..... ١٩٥
٩. ثايولات النيتروزو ١٩٧
الفصل السادس: الاصناف الفعالة الاخرى ١٩٩
اصناف الكبريت الفعالة *Reactive Sulphar Species (RSS)* ١٩٩
عمليات أكسدة مجموعة الثايول في جزيئة الكلوتاثايون..... ٢٠٢
اصناف الكاربون الفعالة *Reactive Carbone Species (RCS)* ٢٠٤
٣.مركبات الكاربونيل *Carbonyl compounds*..... ٢٠٥
اصناف الهاليدات الفعالة *Reactive halogenated species (RHS)* ٢٠٨
١. الكلور وحامض الهايبوكلوروس ٢٠٨
الفصل السابع: مضادات الأكسدة..... ٢١١
المقدمة: ٢١١
تعريف مضادات الأكسدة ٢١٢
فوائد مضادات الأكسدة في جسم الكائن الحي..... ٢١٣
مضادات الأكسدة المثالية *Ideal antioxidants* ٢١٤
مضادات الأكسدة والغذاء المتناول..... ٢١٥
مساعدات مضادات الأكسدة..... ٢١٦

مواقع بعض مضادات الأكسدة داخل الخلية..... ٢١٦
أصناف مضادات الأكسدة..... ٢١٧
١. مضادات الأكسدة غير الإنزيمية *Non-enzymatic antioxidants*..... ٢١٨
I- مضادات الأكسدة الفيتامينية ٢١٩
II- مضادات الأكسدة الحاوية على مجموعة الثايول..... ٢٢٠
III- البروتينات المضادة للأكسدة..... ٢٢٠
IV- الفينولات *Phenols*..... ٢٢١
V- كاروتينويدات *Carotenoids*..... ٢٢١
VI- القلويدات *Alkaloids* ٢٢١
VII- الكوينونات *Quinones*..... ٢٢٢
VIII- المضادات الأكسدة الهورمونية وغير الهورمونية..... ٢٢٢
VIIII- مضادات الأكسدة العناصر المعدنية ٢٢٣
IX- المضادات الأكسدة المحضرة *Synthetic Antioxidants* ٢٢٣
٢. مضادات الأكسدة الإنزيمية *Enzymatic antioxidants*..... ٢٢٣
أمثلة على بعض انواع المضادات الأكسدة المحضرة ٢٢٧
١. بيوتيلايتيد هيدروكسي تلوين *Butylated (BHT)*
hydroxytoluene.....٢٢٧
٢. بيوتالايتيد هيدروكسي انيسول *Butylated hydroxyanisole (BHA)*... ٢٢٨
٣. الاسبرين *Aspirin*..... ٢٢٩
الفصل الثامن: مضادات الأكسدة الفيتامينية *Vitamin antioxidants*..... **٢٣١**
١- فيتامين *E (Vitamin E)* ٢٣١

١ , ١. ميكانيكية عمل فيتامين *E* كمضاد اكسدة وأكسدته أكسدة تامة ٢٣٤

١ , ٢ , ١. اعادة تنشيط الفا –توكوفيرول من جذر التوكوفيروكسي ٢٣٦

٢– فيتامين *C (Vitamin C)*..... ٢٣٩

٢ , ١. عمل فيتامين *C* كمضاد أكسدة ٢٤١

٢ , ٢. بعض تفاعلات فيتامين *C* بمشاركته كمضاد أكسدة..... ٢٤٣

التفاعلات البنية لحامض الاسكوربيك..... ٢٤٦

٢ , ٣. الافراط في تناول فيتامين *C*..... ٢٤٦

٣– فيتامين *A (Vitamin A)* ٢٤٧

٤– حامض الفوليك *Folic acid* ٢٤٩

٤ , ١. عمل حامض الفوليك كمضاد الأكسدة:..... ٢٥٢

٥– فيتامين *K (Vitamin K)* ٢٥٣

٦– فيتامين *B6 (Vitamin B6)* ٢٥٥

الفصل التاسع: مضادات الأكسدة الحاوية على مجموعة الثايول **٢٥٧**

١. الكلوتاثايون *Glutathione (GSH)* ٢٥٧

١ , ١. دور الكلوتاثايون كمضاد للأكسدة ٢٥٩

٢. حامض اللايبويك *α–Lipoic Acid* ٢٦٢

٣. التايورين *Taurine* ٢٦٥

٤– الثايوردوكسين *Thioredoxin* ٢٦٧

٥. الهوموسستين *Homocysteine*..... ٢٦٨

٦. *N*-*L*- اسيتايل- سستين ٢٧١

٧. السستين *Cysteine* ٢٧١

الفصل العاشر: البروتينات المضادة للأكسدة ٢٧٣

١. الألبومين *Albumin* ٢٧٣

٢. السيرولوبلازمين *Ceruloplasmin* ٢٧٤

٣. بروتين علامة الشيخوخة-٣٠ ..... ٢٧٥

٤. الهيموكلوبين *Hemoglobin* ٢٧٧

٥. اللاكتوفيرين *Lactoferrin* ٢٨٠

٦. الترانسفيرين *Transferrin* ٢٨٠

٧. الهيموسيدرين *Hemosedrin* ٢٨١

٨. الفيرتين *Ferritin* ٢٨١

٩. ميتالوثيونين *Metallothionein* ٢٨٢

١٠. الميتالومثيونين *Metalomethionine* ٢٨٣

١١. ترانسكوبيرين *Transcuprein* ٢٨٣

١٢. الهيموبكسين *Haemopexin* ٢٨٤

١٣. الهابتوكلوبين *Haptoglobin* ٢٨٤

الفصل الحادي عشر: مضادات الأكسدة الفينولية ٢٨٧

الفينولات *Phenols* ٢٨٧

بعض مصادر بعض الفلافونويدات والاحماض الفينولية في النباتات: ٢٨٩

الفلافونويدات *Flavonoids* ٢٨٩

أ. الانثوسيانينات ٢٩٠

ب- الانثوزانثينات ٢٩١

العوامل المؤثرة على فعالية الفلافونويدات لإداء وظائفها المختلفة ٢٩٧

أمثلة على بعض مركبات متعددة الفينول: ٢٩٩

١. كيورستين *Quercetin* ٢٩٩
٢. حامض روزمارنيك *Rosmarinic acid* ٣٠٠
٣. تانينات *Tannins* ٣٠٠
٤. روتين *Rutin* ٣٠٢
٥. ثايمول *Thymol* ٣٠٣
٦. هيدروكسي تايروسول *Hydroxytyrosol* ٣٠٤
الكاروتينويدات *Carotenoids* ٣٠٤
وظائف الكاروتينويدات ٣٠٥
وصف لبعض انواع الكاروتينويدات المهمة ٣٠٦
١. بيتا –كاروتين *b-carotene* ٣٠٦
١, ١. ميكانيكية بيتا – كاروتين في ازالة الأكسدة ٣٠٨
٢. الليكوبين *Lycopene* ٣١١
القلويدات *Alkaloids* ٣١٢
وصف لبعض انواع القلويدات المهمة ٣١٤
١. حامض اليوريك *Uric acid* ٣١٤
١, ١. دور حامض اليوريك كمضاد للأكسدة ٣١٥
٢. الكافايين *Caffeine* ٣١٦
٣. فينبوستين *Vinpocetine* ٣١٩
٤. هيدرجين *Hydergine* ٣٢٠
الفصل الثاني عشر: مضادات الاكسدة الكوينية ٣٢٣
الكوينونات *Quinones* ٣٢٣

١- مرافق الإنزيم Q (Coenzyme Q) (اليبكوينول Ubiquinol / اليبكوينون Ubiquinone) ٣٢٣
٢- بلاستوكوينون Plastoquinone ٣٢٥
٣- بيرولوكوينولين كوينون Pyrroloquinoline quinone ٣٢٦
البترينات Pterins ٣٢٨
المليبدوبترينات Molybdopterins ٣٣٠
الفصل الثالث عشر: مضادات الاكسدة العناصر المعدنية ٣٣٣
المقدمة: ٣٣٣
١. الحديد Iron ٣٣٤
٢. النحاس Copper ٣٣٦
٣. الخارصين Zinc ٣٣٧
٤. المغنيسيوم Magnesium ٣٣٩
٥. المنغنيز Manganis ٣٤١
٦- السلينيوم Selenium ٣٤٢
الفصل الرابع عشر: أنواع المضادات الأكسدة الاخرى ٣٤٧
المضادات الأكسدة الهورمونية ٣٤٧
١. هورمون الميلاتونين Melatonine hormone ٣٤٧
١,١. دور الميلاتونين كمضاد الأكسدة ٣٤٩
٢. الأستروجينات Estrogens ٣٥٠
٣. الاريثروبايوتين Erythropoietin ٣٥٢
مضادات الأكسدة الهستيدينة – الحاوية على ببتيد ثنائي ٣٥٣
وصف لبعض انواع الهستيدين-ثنائية الببتيد: ٣٥٥

١. الكارنوسين *Carnosine* ٣٥٥
٢. -*N*-اسيتايل كارنوسين *N-acetylcarnosine* ٣٥٧
٣. انسيرين *Anserine* ٣٥٨
مركبات ألفا-احماض كيتو *a-Ketoacids* ٣٥٨
١. ألفا-كيتو كلوتاريت *α-ketoglutarate* ٣٥٩
٢. البايروفيت *Pyruvate* ٣٦١
٣. اللاكتيت *Lactate* ٣٦٢
البليروبين *Bilirubin* ٣٦٤
المرافق الإنزيمي نيكوتينأمايد ادنين ثنائي النيوكليوتيد فوسفات *NADPH* .. ٣٦٧
الكرياتين *Creatine* ٣٧١
مركبات متعددة الأمين *Polyamines* ٣٧٢
حامض الفايتيك *Phytic Acid* ٣٧٤
المخاط *Mucus* ٣٧٥
صبغة الميلانين *Melanin* ٣٧٦
ايوميلانين *Eumelanin* ٣٧٦
٢. نيوروميلانين *Neuromelanin* ٣٧٨
ابسيلين *Ebselen* ٣٧٩
ديسفيروكسأمين *E* و *B (Desferrioxamine E and B)* ٣٨٠
اللاكتونات *Lactones* ٣٨١
الفصل الخامس عشر: مضادات الأكسدة الإنزيمية ٣٨٣
١- إنزيم سوبر أوكسيد ديسميوتيز *Superoxide dismutase* ٣٨٣
١,١. ميكانيكية عمل إنزيم *SOD* ٣٨٤

٢. إنزيم الكتاليز *Catalase* ٣٨٦
٢ , ١. ميكانيكية عمل إنزيم الكتاليز ٣٨٦
٣. كلوتاثايون بيروكسيديز *Glutathione peroxidase* ٣٨٧
٤. إنزيم كلوتاثايون ردكتيز *Glutathione reductase* ٣٩٠
٤ , ١. ميكانيكية عمل إنزيم كلوتاثايون ردكتيز ٣٩١
٥. إنزيم الثايوردوكسين ردكتيز *Thioredoxin reductase* ٣٩٢
٦. إنزيم كلوتاريدوكسين *Glutaredoxin* ٣٩٤
٧. إنزيم كلوكوز ٦– فوسفات ديهايدروجنيز ٣٩٧
٨. إنزيم البارأوكسونيز–١ (*Paraoxonase-1*) ٣٩٧
٩. إنزيم كلوتاثايون -*S*ترانسفيريز *Glutathione S-transferase* ٣٩٨
٩ , ١. دور إنزيم كلوتاثايون -*S*ترانسفريز في عملية ازالة المواد السامة ... ٤٠١
١٠. إنزيم بروتين – ثنائي كبريتيد ايزوميريز *Protein–disulfide isomerase*... ٤٠٤
١١. إنزيم مثيونين سلفوكساید ردكتيز *Methionene sufuoxide reductase*... ٤٠٥
١٢. إنزيم بيروكسي ردوكسين *Peroxiredoxin* ٤٠٧
١٣. إنزيم سلفاريدوكسين *Sulfiredoxins* ٤٠٩
١٤. إنزيم *DNA* بوليمريز *DNA polymerase* ٤١٠
وإنزيم *DNA* لايكيز *DNA ligase* ٤١٠
١٥. إنزيم بروتيز *Protease* ٤١٢
١٦. إنزيم هيم أوكسجينيز *Heme Oxygenase* ٤١٢
١٧. إنزيم ثايوردوكسين بيروكسيديز *Thioredoxin Peroxidase* ٤١٤
١٨. إنزيم الاسكوربيت بيروكسيديز *Ascorbate peroxidase*..... ٤١٤
١٩. إنزيم بليفردين ردكتيز *Biliverdin reductase* ٤١٤

دراسة علاقة بعض مضادات الأكسدة مع بعضها البعض..... ٤١٥
قائمة المختصرات..... ٤١٩
المصادر..... ٤٢٥
فهرس المحتويات..... ٤٦٥