

Pentose phosphate pathway and NADPH

فيه كل كلام الدكتورہ ان شاء الله

The pentose phosphate pathway

2 NADPH at all

- also called the **hexose monophosphate shunt** or **6-phosphogluconate pathway**

يُسمى أيضًا مسار فوسفات الهكسوز الأحادي أو مسار 6-فوسفوجلوكونات

- It occurs in the **cytosol** of the cell. mainly in liver cells

- It consists of **two, irreversible oxidative reactions**, followed by a series of **reversible sugar-phosphate interconversions**

< يتكون من اثنين من مؤكسدات غير قابلة
لانعكاس من سكر-فوسفات قابل للانعكاس

- **No ATP** is directly consumed or produced in the cycle.

< لا يتم استهلاك أو إنتاج ATP
بشكل مباشر في الدورة.

- **Carbon one of glucose 6-phosphate is released as CO₂**, and **two NADPH** are produced for each glucose 6-phosphate molecule entering the oxidative part of the pathway.

يتم إطلاق ذرة الكربون الأولى من جلوكوز 6-فوسفات على شكل CO₂، ويتم إنتاج جزيئين
من NADPH لكل جزيء جلوكوز 6-فوسفات يدخل الجزء المؤكسد من المسار.

بدنا غلوكوز يعني لازم اكون ماكل عشان تحدث هذه العملية

- The pathway provides a major portion of the body's NADPH, which functions as a **biochemical reductant.**

يوفر المسار جزءًا كبيرًا من NADPH في الجسم، والذي
يعمل كعامل اختزال كيميائي حيوي.

The pentose phosphate pathway

- Ribose 5-phosphate is required for the biosynthesis of nucleotides and provides a mechanism for the metabolic use of five-carbon sugars obtained from the diet or the degradation of structural carbohydrates in the body.

يُعد ريبوز 5-فوسفات ضروريًا للتخليق الحيوي للنيوكليوتيدات، ويوفر آلية للاستخدام الأيضي للسكريات الخماسية الكربون المُستمدة من النظام الغذائي أو لتحلل الكربوهيدرات الهيكلية في الجسم.

- The oxidative portion of the pentose phosphate pathway occurs in:

< يحدث الجزء التأكسدي من مسار فوسفات البننتوز في:

لأنه يصنع ال
cholesterol ايضاً

- Liver and lactating mammary glands, which are active in the biosynthesis of fatty acids

< الكبد والغدد الثديية المرضعة، والتي تنشط في التخليق الحيوي للأحماض الدهنية

بدي
aldosterone
لأنه

- Adrenal cortex, which is active in the NADPH-dependent synthesis of steroids

قشرة الغدة الكظرية، والتي تنشط في التخليق المعتمد على NADPH للستيرويدات

- Erythrocytes, which require NADPH to keep glutathione reduced.

< كريات الدم الحمراء، والتي تتطلب NADPH للحفاظ على اختزال الجلوتاثيون.

بدي اعمل reduction لل radical مثل O عليها الكترول .
فيالمقابل هذا بصيرله oxidation بس كميته محدودة

Irreversible oxidative reactions

نزع الهيدروجين من جلوكوز 6-فوسفات (الخطوة المحددة لمعدل التفاعل) < يحفز إنزيم نازع هيدروجين الجلوكوز 6-فوسفات (G6PD) أكسدة غير قابلة للانعكاس للجلوكوز 6-فوسفات إلى 6-فوسفوجلوكونولاکتون في تفاعل خاص بـ NADP كإنزيم مساعد له، مما ينتج جزيء واحد من NADPH

1 - Dehydrogenation of glucose 6-phosphate (the rate limiting step)

➤ **Glucose 6-phosphate dehydrogenase (G6PD)** catalyzes an irreversible oxidation of glucose 6-phosphate to 6-phosphogluconolactone in a reaction that is specific for NADP as its coenzyme which produce one molecule of NADPH

اهم خطوة

- The enzyme is competitively inhibited by NADPH so its regulated by the NADP/NADPH ratio in the cell < يتم تثبيط الإنزيم تنافسيًا بواسطة NADPH، لذا يتم تنظيمه بواسطة نسبة NADP/NADPH في الخلية
- Insulin enhances G6PD gene expression (well-fed state)

< يعزز الأنسولين التعبير الجيني لـ G6PD (حالة التغذية الجيدة)

2 - Formation of ribulose 5-phosphate

➤ Phosphogluconolactone is hydrolyzed by **6-phosphogluconolactone hydrolase** (irreversible and not rate-limiting).

< يتم تحلل فوسفوجلوكونولاکتون بواسطة هيدرولاز 6-فوسفوجلوكونولاکتون (غير قابل للانعكاس وغير محدد لمعدل التفاعل).

هذا يلي نتج من هذه العملية

➤ The subsequent oxidative decarboxylation of 6-phosphogluconate is catalyzed by **6-phosphogluconate dehydrogenase** (irreversible) to produce a pentose sugar-phosphate (ribulose 5-phosphate), CO₂ (from carbon 1 of glucose), and a second molecule of NADPH → ketose form

< يتم تحفيز نزع الكربوكسيل التأكسدي اللاحق لـ 6-فوسفوجلوكونات بواسطة نازعة هيدروجين 6-فوسفوجلوكونات (غير قابل للانعكاس) لإنتاج سكر فوسفات خماسي (ريبولوز 5-فوسفات)، CO₂ (من الكربون 1 من الجلوكوز)، وجزيء ثانٍ من NADPH

Reversible nonoxidative reactions

- The nonoxidative reactions of the pentose phosphate pathway occur in all cell types synthesizing nucleotides and nucleic acids. These reactions catalyze the interconversion of three-, four-, five-, six-, and seven- carbon sugars.

تحدث التفاعلات غير المؤكسدة لمسار فوسفات البننتوز في جميع أنواع الخلايا التي تُصنع النيوكليوتيدات والأحماض النووية. تُحفّز هذه التفاعلات التحويل المتبادل للسكريات ذات الثلاث والأربع والخمس والست والسبع ذرات كربون.

- These reversible reactions permit ribulose 5-phosphate to be converted either to ribose 5-phosphate or to intermediates of glycolysis-fructose 6-phosphate and glyceraldehyde 3-phosphate.

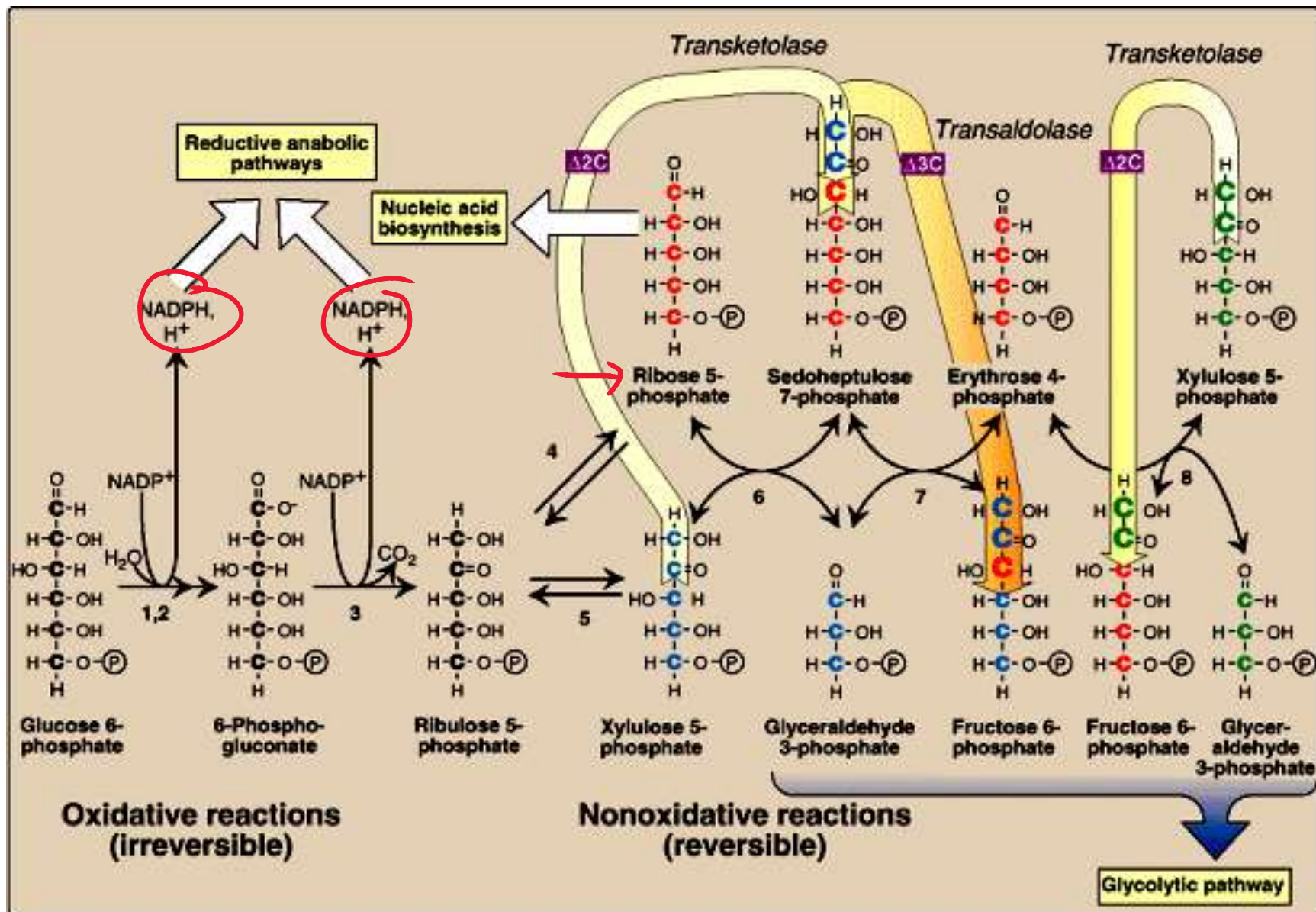
تسمح هذه التفاعلات العكوسة بتحويل ريبولوز 5-فوسفات إما إلى ريبوز 5-فوسفات أو إلى وسائط تحلل الجلوكوز - فركتوز 6-فوسفات وجليسرالدهيد 3-فوسفات.

- In reductive biosynthetic reactions, there is a great need for NADPH, so transketolase (which transfers two-carbon units) and transaldolase (which transfers three-carbon units) convert the ribulose 5-phosphate to glyceraldehyde 3-P and fructose 6-P, which are intermediates of glycolysis

في التفاعلات التخليقية الحيوية الاختزالية، هناك حاجة كبيرة إلى NADPH، لذا يقوم الترانسكيتولاز (الذي ينقل وحدات ثنائية الكربون) والترانسالدولاز (الذي ينقل وحدات ثلاثية الكربون) بتحويل الريبولوز 5-فوسفات إلى جليسرالدهيد 3-P والفركتوز 6-P، وهما وسيطان لتحلل السكر.

- At increased demands for ribose to synthesize nucleic acids, the non-oxidative reactions can provide the biosynthesis of ribose 5-P from G-3-P and F-6-P in the absence of the oxidative steps

مع ازدياد الطلب على الريبوز لتخليق الأحماض النووية، يمكن للتفاعلات غير المؤكسدة أن توفر التخليق الحيوي للريبوز 5-فوسفات من الجليسرول 3-فوسفات والفركتوز 6-فوسفات في غياب خطوات الأكسدة



NADPH

يختلف الإنزيم المساعد NADP عن NAD فقط بوجود مجموعة فوسفات (PO) على إحدى وحدات الريبوز

- The coenzyme NADP differs from NAD only by the presence of a phosphate group (PO_4^-) on one of the ribose units

1:10

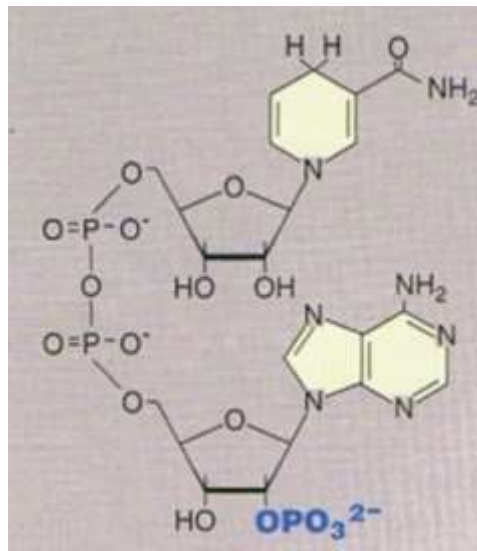
- The steady-state ratio of NADP/NADPH in the cytosol of hepatocytes is approximately 0.1, which favors the use of NADPH in reductive biosynthetic reactions

تبلغ نسبة NADP/NADPH في حالة الاستقرار في سيتوبلازم خلايا الكبد حوالي 0.1، مما يُرَجِّح استخدام NADPH في تفاعلات التخليق الحيوي الاختزالية

1000:1

- This contrasts with the high ratio of NAD/NADH approximately 1000 in the cytosol of hepatocytes, which favors an oxidative role for NAD

هائي الارقام الي كاتها هو تفسير نسبة كل واحد مقارن بالثاني



< يتناقض هذا مع النسبة العالية لـ NAD/NADH التي تبلغ حوالي 1000 في سيتوسول خلايا الكبد، مما يُرَجِّح دورًا مؤكسدًا لـ NAD

Uses of NADPH

A. Reduction of hydrogen peroxide



- Hydrogen peroxide is formed from the partial reduction of molecular oxygen

< يتكون بيروكسيد الهيدروجين من الاختزال الجزئي للأكسجين الجزيئي

- It is formed continuously as by-products of aerobic metabolism, through reactions with drugs and environmental toxins, or when the level of antioxidants is diminished, all creating the condition of oxidative stress.

ويتكون باستمرار كمنتجات ثانوية لعملية التمثيل الغذائي الهوائي، ومن خلال التفاعلات مع الأدوية والسموم البيئية، أو عندما ينخفض مستوى مضادات الأكسدة، مما يخلق حالة الإجهاد التأكسدي.

- These highly reactive oxygen intermediates can cause serious chemical damage to DNA, proteins, and unsaturated lipids, and can lead to cell death.

بحولي ال adenine and guanine ل uric acid

< يمكن أن تسبب وسائط الأكسجين شديدة التفاعل هذه أضرارًا كيميائية خطيرة للحمض النووي والبروتينات والدهون غير المشبعة، ويمكن أن تؤدي إلى موت الخلايا.

- The cell has several protective mechanisms that minimize the toxic potential of these compounds.

تمتلك الخلية العديد من الآليات الوقائية التي تقلل من السمية المحتملة لهذه المركبات.

Uses of NADPH

A. Reduction of hydrogen peroxide

➤ Enzymes that catalyze antioxidant reactions:

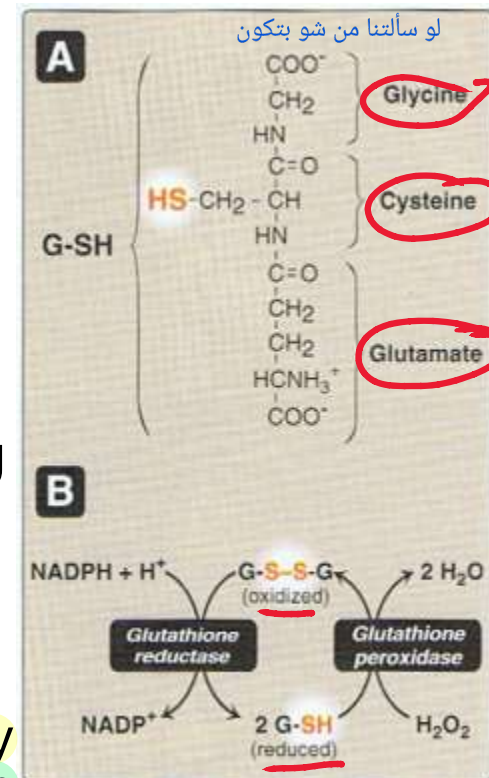
➤ Reduced glutathione, a tripeptide-thiol present in most cells, can chemically detoxify hydrogen peroxide that is catalyzed by the selenium-requiring glutathione peroxidase, forms oxidized glutathione, which no longer has protective properties

➤ The cell regenerates reduced glutathione in a reaction catalyzed by glutathione reductase, using NADPH as a source of reducing electrons. NADPH indirectly provides electrons for the reduction of hydrogen peroxide

تقوم الخلية بتجديد الجلوتاثيون المختزل في تفاعل يحفزه مختزل الجلوتاثيون، باستخدام NADPH كمصدر للإلكترونات المختزلة. يوفر NADPH بشكل غير مباشر الإلكترونات لاختزال بيروكسيد الهيدروجين

➤ Erythrocytes are totally dependent on this pathway for their supply of NADPH so any defect, hydrogen peroxide will accumulate, threatening membrane stability and causing red cell lysis

يمكن للجلوتاثيون المختزل، وهو ثلاثي بيتيد-ثيول موجود في معظم الخلايا، أن يزيل سمية بيروكسيد الهيدروجين كيميائياً. يتم تحفيز هذا التفاعل بواسطة بيروكسيداز الجلوتاثيون الذي يتطلب السيلينيوم، مما يؤدي إلى تكوين الجلوتاثيون المؤكسد، الذي لم يعد له خصائص وقائية



تعتمد كريات الدم الحمراء كلياً على هذا المسار لزيوتها بـ NADPH، لذا فإن أي خلل فيه سيؤدي إلى تراكم بيروكسيد الهيدروجين، مما يهدد استقرار الغشاء ويسبب تحلل خلايا الدم الحمراء

Uses of NADPH

A. Reduction of hydrogen peroxide

- **Superoxide dismutase and catalase**, catalyze the conversion of other toxic oxygen intermediates to harmless products so guard the cell against the toxic effects of reactive oxygen species.

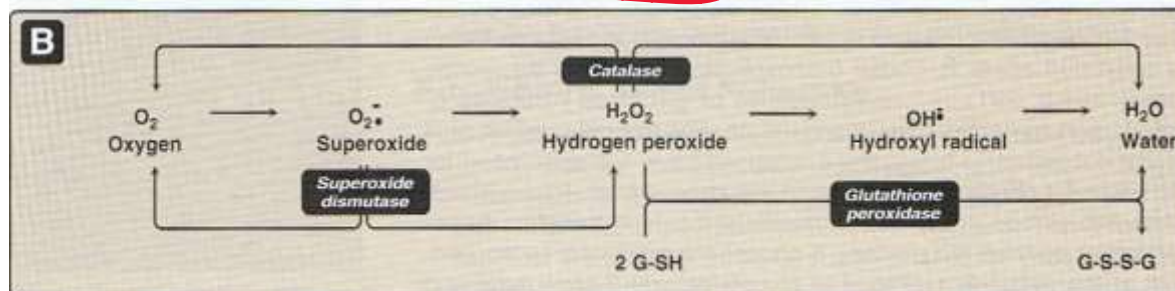
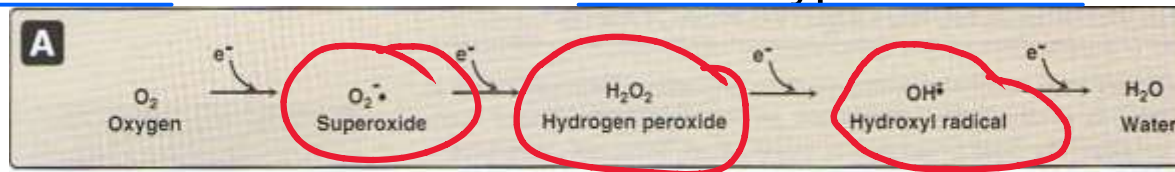
يحفز إنزيم ديسموتاز الفائق الأكسيد وإنزيم الكاتالاز تحويل وسائط الأكسجين السامة الأخرى إلى منتجات غير ضارة، وبالتالي يحمي الخلية من الآثار السامة لأنواع الأكسجين التفاعلية.

- **Antioxidant chemicals**: A number of intracellular reducing agents such as ascorbate, vitamin E, and β -carotene, are able to reduce and detoxify oxygen intermediates in the laboratory.

< المواد الكيميائية المضادة للأكسدة: هناك عدد من عوامل الاختزال داخل الخلايا، مثل الأسكوربات وفيتامين E وبيتا كاروتين، قادرة على اختزال وسائط الأكسجين وإزالة سميتها في المختبر.

- **Consumption of foods rich in these antioxidant compounds** has been correlated with a reduced risk for certain types of cancers

وقد ارتبط استهلاك الأطعمة الغنية بهذه المركبات المضادة للأكسدة بانخفاض خطر الإصابة بأنواع معينة من السرطان



Uses of NADPH

B. Cytochrome P450 monooxygenase system

< تقوم إنزيمات MonoOxygenase بدمج ذرة واحدة من الأكسجين الجزيئي في الركيزة (مما يؤدي إلى إنشاء مجموعة هيدروكسيل)، مع اختزال الذرة الأخرى إلى الماء.

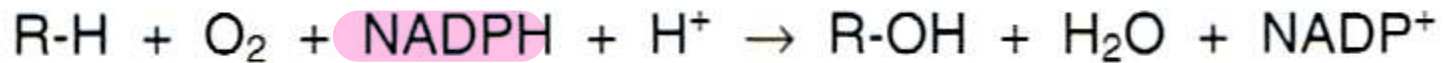
- Monooxygenases incorporate one atom from molecular oxygen into a substrate (creating a hydroxyl group), with the other atom being reduced to water.

في نظام السيتوكروم P450 أحادي الأكسجين، يوفر NADPH مكافئات الاختزال التي تتطلبها هذه السلسلة من التفاعلات

- In the cytochrome P450 monooxygenase system, NADPH provides the reducing equivalents required by this series of reactions

< التفاعل الكلي الذي يحفزه إنزيم السيتوكروم P450 هو:

- The overall reaction catalyzed by a cytochrome P450 enzyme is:



- where R may be a steroid, drug, or other chemical

< حيث قد يكون R ستيرويدا أو دواء أو مادة كيميائية أخرى

نظام الميتوكوندريا: يشارك في هيدروكسلة الستيرويدات مما يجعلها أكثر قابلية للذوبان في الماء.

- Mitochondrial system: involved in the hydroxylation of steroids that makes them more water soluble.

- in the steroid hormone-producing tissues, such as the placenta, ovaries, testes, and adrenal cortex, it is used to hydroxylate intermediates in the conversion of cholesterol to steroid hormones

في الأنسجة المنتجة للهرمونات الستيرويدية، مثل المشيمة والمبيض والخصيتين وقشرة الغدة الكظرية، يتم استخدامه كمركب هيدروكسيل وسيط في تحويل الكوليسترول إلى هرمونات الستيرويد. ويستخدم الكبد هذا النظام في تخليق حمض الصفراء.

- The liver uses this system in bile acid synthesis

- the kidney uses it to hydroxylate vitamin 25-hydroxycholecalciferol

(vitamin D) to its biologically active 1,25-hydroxylated form.

أخذناها بالانATOMي انه عشان فيتامين D يصير active يتم على مرحلتين وهاي الثانية

تستخدمه الكلية لدرجة

فيتامين 25-هيدروكسي

كوليالكالسيفيرول (فيتامين

د) إلى شكله النشط

بيولوجيا

1,25-هيدروكسي.

Uses of NADPH

B. Cytochrome P450 monooxygenase system

الكثير استخداما للتخلص من الادوية

- ② ➤ **Microsomal system: found associated with the membranes of the smooth endoplasmic reticulum (particularly in the liver) is the detoxification of foreign compounds (xenobiotics). These include numerous drugs and such varied pollutants as petroleum products, carcinogens, and pesticides**

النظام الميكروسومي: يوجد مرتبطًا بأغشية الشبكة الإندوبلازمية الملساء (خاصة في الكبد) وهو إزالة سمية المركبات الغريبة (الزنيوبيوتيك). وتشمل هذه العديد من الأدوية والملوثات المتنوعة مثل المنتجات البترولية والمواد المسرطنة والمبيدات الحشرية

< يمكن استخدامه لدرجة هذه السموم، باستخدام NADPH كمصدر للمكافئات المختزلة من أجل:

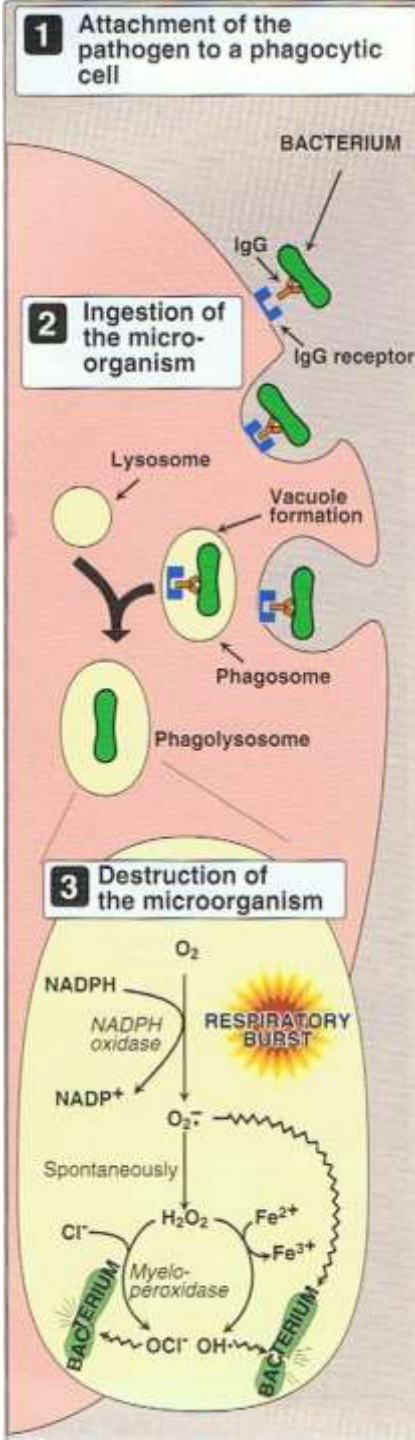
- **It can be used to hydroxylate these toxins, using NADPH as the source of reducing equivalents in order to:**

ال liver بميز ال polarity بس
اهم اشي اعمله polar عشان يطلع من الجسم

- **activate or inactivate a drug** تفعيل أو تعطيل الدواء
- **make a toxic compound more soluble, thus facilitating its excretion in the urine or feces** جعل المركب السام أكثر قابلية للذوبان، مما يسهل إخراجه في البول أو البراز
- **Frequently the new hydroxyl group will serve as a site for conjugation with a polar compound, such as glucuronic acid, which will significantly increase the compound's solubility.**

يعني اذا كان في عنا اشي nonpolar وبدي اطلعه من الجسم بتروح ال liver بتحط عليه اشي highly polar او negative charge عشان يصير polar ويطلع

< في كثير من الأحيان، ستكون مجموعة الهيدروكسيل الجديدة بمثابة موقع للاقتتران مع مركب قطبي، مثل حمض الجلوكورونيك، والذي سيزيد بشكل كبير من قابلية ذوبان المركب.



Uses of NADPH

C. Phagocytosis by white blood cells

- NADPH provides the reducing equivalents for phagocytes in the process of eliminating invading microorganisms

يوفر NADPH معادلات الاختزال للخلايا البالغة في عملية القضاء على الكائنات الحية الدقيقة الغازية

- NADPH oxidase uses molecular oxygen and NADPH electrons to produce superoxide radicals, which can be converted to peroxide, hypochlorous acid, and hydroxyl radicals using Myeloperoxidase enzyme.

يستخدم إنزيم NADPH أوكسيداز الأوكسجين الجزيئي والكروونات NADPH لإنتاج جذور فوق الأكسيد، والتي يمكن تحويلها إلى بيروكسيد وحمض الهيبوكلوروس وجذور الهيدروكسيل باستخدام إنزيم مايلوبيروكسيداز.

- A genetic defect in NADPH oxidase causes chronic granulomatosis, a disease characterized by severe, persistent, chronic infections.

يسبب خلل وراثي في إنزيم NADPH أوكسيداز الورم الحبيبي

المزمن، وهو مرض يتميز بحدوث مزمته شديدة ومستمرة هون إذا عندي نقص بالانزيم هذا ما رح يتحول الأوكسجين ل radical وما رح يتخلص لي من الميكروبات

- Any superoxide that escapes the phagolysosome is converted to hydrogen peroxide by superoxide dismutase (SOD).

هون المشكلة انه ال superoxide طلع لبرا وتحول ل radical فبتزيد العبء عشان نتخلص من ال radicals لانه مثل ما قلنا انها بتخربلي كثير اشياء وعشان هيك عند الاطفال دايمًا مرضهم يكون خطير حتى لو حمى لانه عنده ما يكون كمية كافية من المواد يلي بتتخلصلي من ال radicals

- Excess peroxide is either neutralized by catalase or by glutathione peroxidase

< يتم تحييد البيروكسيد الزائد بواسطة الكاتالاز أو بواسطة بيروكسيداز الجلوتاثيون

Uses of NADPH

D. Synthesis of nitric oxide

- Nitric oxide (NO) is recognized as a mediator in a broad array of biologic systems.

يُعرف أكسيد النيتريك (NO) كوسيط في مجموعة واسعة من الأنظمة البيولوجية.

- NO is the endothelium-derived relaxing factor, which causes vasodilation by relaxing vascular smooth muscle. NO also acts as a neurotransmitter, prevents platelet aggregation, and plays an essential role in macrophage function

هو عامل مُرخي مُشتق من البطانة، يُسبب توسع الأوعية الدموية عن طريق إرخاء NO أيضًا كناقل عصبي، ويمنع تراكم الصفائح الدموية، NO العضلات الملساء الوعائية. يعمل ويلعب دورًا أساسيًا في وظيفة البلاعم

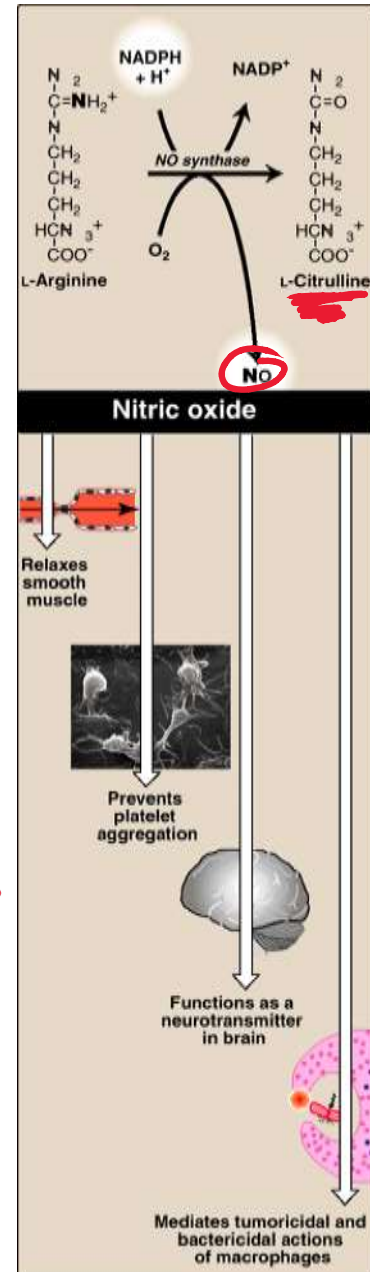
- NO is a free radical gas that has a very short half-life in tissues (three to ten seconds) because it reacts with oxygen and superoxide, and then is converted into nitrates and nitrites.

هو غاز جذري حر له عمر نصف قصير جدًا في الأنسجة (من ثلاث إلى عشر ثوانٍ) NO > لأنه يتفاعل مع الأكسجين والأكسيد الفائق، ثم يتحول إلى نترات و النترت

- Synthesis of NO:

< يتم تصنيعه بواسطة سينسيز NO العصاري الخلوي.

- It is synthesized by the cytosolic NO synthase.
- Flavin mononucleotide (FMN), flavin adenine dinucleotide (FAD), heme, and tetrahydrobiopterin are coenzymes for the enzyme



< أحادي نيوكليوتيد الفلافين (FMN)، وفلافين أدنين ثنائي النوكليوتيد (FAD)، والهيم، ورباعي هيدروبيوبترين هي إنزيمات مساعدة للإنزيم

هذا الانزيم يلي بصنع قلنا ال NADPH طيب اذا كان في عندي نقص فيه او مافي منه شو بصير ؟

Glucose 6-Phosphate dehydrogenase deficiency

هذا النقص مرض وراثي يتميز بفقر الدم الانحلالي. يُضعف نقص إنزيم G6PD قدرة الخلية على تكوين NADPH الضروري للحفاظ على مخزون الجلوتاثيون المختزل.

وَممكن mutation

- This deficiency is a genetic disease characterized by hemolytic anemia. G6PD deficiency impairs the ability of the cell to form the NADPH that is essential for the maintenance of the reduced glutathione pool.
- The cells most affected are the red blood cells because they do not have additional sources of NADPH. Free radicals and peroxides formed within the cells cannot be neutralized, causing denaturation of protein (as hemoglobin) and membrane proteins.
- The cells become rigid, and they are removed by the reticuloendothelial system of the spleen and liver.
- Hemolytic anemia can be caused by the production of free radicals and peroxides following the taking of oxidant drugs, ingestion of fava beans or severe infections.

الخلايا الأكثر تأثراً هي خلايا الدم الحمراء لأنها لا تحتوي على مصادر إضافية لـ NADPH. لا يمكن تحييد الجذور الحرة والبيروكسيدات المتكونة داخل الخلايا، مما يتسبب في تمسخ البروتين (مثل الهيموجلوبين) وبروتينات الغشاء.

تصبح الخلايا صلبة، ويتم التخلص منها بواسطة الجهاز الشبكي البطاني في الطحال والكبد.

يمكن أن يحدث فقر الدم الانحلالي بسبب إنتاج الجذور الحرة والبيروكسيدات بعد تناول الأدوية المؤكسدة، أو تناول الفول، أو الإصابة بعدوى شديدة.

Glucose 6-Phosphate dehydrogenase deficiency

- Babies with G6PD deficiency may experience neonatal jaundice appearing one to four days after birth.

< قد يُصاب الأطفال الذين يعانون من نقص G6PD باليرقان الوليدي الذي يظهر بعد يوم إلى أربعة أيام من الولادة.

- The degree of severity of the anemia depends on the location of the mutation in the G6PD gene

تعتمد درجة شدة فقر الدم على موقع الطفرة في جين إنزيم نازع هيدروجين الجلوكوز 6-فوسفات

- Class I mutations are the most severe (for example, G6PD Mediterranean). They are often associated with chronic nonspherocytic anemia.

طفرات الفئة الأولى هي الأشد (على سبيل المثال، طفرات إنزيم نازع هيدروجين الجلوكوز 6-فوسفات المتوسطة). وغالبًا ما ترتبط بفقر الدم المزمن غير الكروي.

- Class III mutations (for example, G6PD A-) cause a more moderate form of the disease

< طفرات الفئة الثالثة (على سبيل المثال، G6PD A-) تسبب شكلًا أكثر اعتدالًا من المرض

ما شرحت كثير الدكتوراة عنهم بس قالت انه الاول severe
وانه بعالجه بانه نبعده عنه كل الشياء يلي بتطلع radicals
وانه يزيد من الاكل يلي فيه antioxidants

ملاحظات	آلية/ نوع التفاعل	النواتج	الإنزيم	المتفاعلات	القسم
أولاً: التفاعلات التأكسدية غير العكوسة في PPP					
الخطوة المحددة للسرعة Rate-limiting، بطيئه، NADPH تنافسياً، التعبير الجيني له بالإنسولين.	أكسده/نزع هيدروجين irreversible	6-phosphoglucono- δ-lactone + NADPH + H ⁺	Glucose-6-phosphate dehydrogenase (G6PD)	Glucose-6-phosphate + NADP ⁺	1 التفاعلات التأكسدية غير العكوسة
غير محدّدة للسرعة.	تحلل مائي Hydrolysis irreversible	6-phosphogluconate	6-phosphogluconolactone hydrolase	6-phosphoglucono- δ-lactone + H ₂ O	2 التفاعلات التأكسدية غير العكوسة
يتحرر CO ₂ من الكربون رقم 1 glucose-6-phosphate. ويتكون ثاني NADPH.	أكسدة مع نزع كربوكسيل Oxidative decarboxylation	Ribulose-5-phosphate + CO ₂ + NADPH	6-phosphogluconate dehydrogenase	6-phosphogluconate + NADP ⁺	3 التفاعلات التأكسدية غير العكوسة

ثانياً: التفاعلات غير التأكسدية العكوسة					
لكوفير ribose لصنع النيوكليوتيدات.	عكوس Isomerization	Ribose-5-phosphate	غير مذكور في الملف	Ribulose-5-phosphate	4 التفاعلات غير التأكسدية العكوسة
تهيئة ركانز لتفاعلات نقل وحدات الكربون.	عكوس Epimerization	Xylulose-5-phosphate	غير مذكور في الملف	Ribulose-5-phosphate	5 التفاعلات غير التأكسدية العكوسة
من أهم تفاعلات إعادة ترتيب السكريات.	نقل وحدتين كربونيتين (2C transfer) عكوس	Glyceraldehyde-3- phosphate + Sedoheptulose-7- phosphate	Transketolase	Xylulose-5-phosphate + Ribose-5-phosphate	6 التفاعلات غير التأكسدية العكوسة
يربط PPP بالتحلل السكري.	نقل ثلاث وحدات (3C transfer) عكوس	Fructose-6-phosphate + Erythrose-4- phosphate	Transaldolase	Sedoheptulose-7- phosphate + Glyceraldehyde-3- phosphate	7 التفاعلات غير التأكسدية العكوسة
ينتج وسيطين من glycolysis.	نقل وحدتين كربونيتين (2C transfer) عكوس	Fructose-6-phosphate + Glyceraldehyde-3- phosphate	Transketolase	Xylulose-5-phosphate + Erythrose-4- phosphate	8 التفاعلات غير التأكسدية العكوسة
يحدث عند زيادة الحاجة إلى ribose-5-phosphate حتى يغياب الخطوات التأكسدية.	Reverse nonoxidative interconversion	Ribose-5-phosphate (غير عكس التفاعلات غير التأكسدية)	غير مذكور في الملف	Glyceraldehyde-3- phosphate + Fructose-6-phosphate	9 التفاعلات غير التأكسدية العكوسة

ثالثاً: تفاعلات مرتبطة باستخدامات NADPH					
يزيل السمية التأكسدية.	اختزال فوق أكسيد الهيدروجين/Detoxification	GSSG + 2 H ₂ O	Glutathione peroxidase	2 GSH + H ₂ O ₂	10 الدفاع المضاد للأكسدة
NADPH يزود الإلكترونات بشكل غير مباشر لتقليل H ₂ O ₂ .	اختزال الجلوتاثيون Regeneration المؤكسد	2 GSH + NADP ⁺	Glutathione reductase	GSSG + NADPH + H ⁺	11 الدفاع المضاد للأكسدة
يحول السوبرأوكسيد إلى فوق أكسيد الهيدروجين.	Dismutation	H ₂ O ₂ + O ₂	Superoxide dismutase (SOD)	2 O ₂ ^{-•} + 2 H ⁺	12 الدفاع المضاد للأكسدة
تخلص من البيروكسيد الزائد.	تفكيك فوق أكسيد الهيدروجين	2 H ₂ O + O ₂	Catalase	2 H ₂ O ₂	13 الدفاع المضاد للأكسدة
R قد يكون دواءً أو ستيرويداً أو مادة كيميائية؛ مهم في إزالة السموم وتصنيع الستيرويدات وأحماض الصفراء وتنشيط فيتامين D.	Hydroxylation؛ إدخال ذرة أكسجين واحدة إلى الركيزة واختزال الأخرى إلى ماء.	R-OH + H ₂ O + NADP ⁺	Cytochrome P450 monooxygenase	R-H + O ₂ + NADPH + H ⁺	14 Cytochrome P450 monooxygenase system
مهم لقتل الميكروبات؛ نفسه chronic granulomatosis.	توليد الجذور الحرة/ Respiratory burst	Superoxide radicals (O ₂ ^{-•}) + NADP ⁺	NADPH oxidase	O ₂ + NADPH	15 البلعمة في كريات الدم البيضاء
ناتج قوي مضاد للميكروبات داخل البالعات.	تكوين hypochlorous acid القاتل للجراثيم	HOCl + H ₂ O	Myeloperoxidase	H ₂ O ₂ + Cl ⁻	16 البلعمة في كريات الدم البيضاء
يحتاج FAD، FAD، heme، tetrahydrobiopterin كمرافقات إنزيمية؛ NO يسبب vasodilation ويمنع platelet aggregation ويعمل neurotransmitter.	أكسدة/تكوين NO	L-Citrulline + NO + NADP ⁺	Nitric oxide synthase (NOS)	L-Arginine + O ₂ + NADPH + H ⁺	17 تصنيع أكسيد النتريك

رابعاً: تفاعلات أو تحولات ذُكرت بدون إنزيم محدد					
يتكوّن باستمرار كنتاج جانبي للأبيض الهوائي أو مع الأدوية والسموم.	اختزال جزئي للأكسجين	H ₂ O ₂	غير مذكور	O ₂ (partial reduction)	18 تفاعلات بدون إنزيم محدد
يفسر قصر العمر النصفى في NO، الأوعية oxidative conversion	تفاعل جذري سريع/ oxidative conversion	Nitrates + Nitrites	غير مذكور	NO + O ₂ أو NO ₂	19 تفاعلات بدون إنزيم محدد