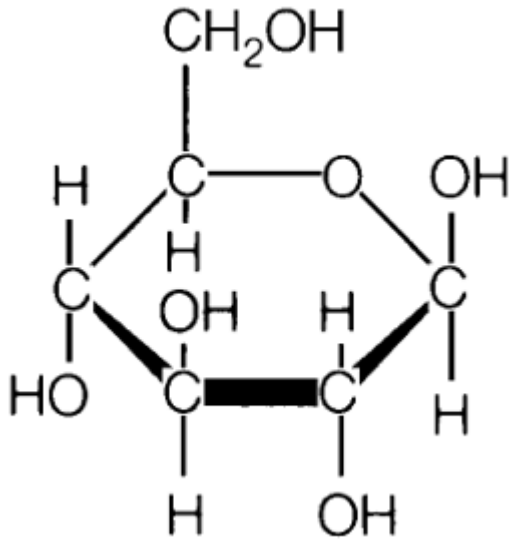
کربوهیدرات

$C_nH_{2n}O_n$



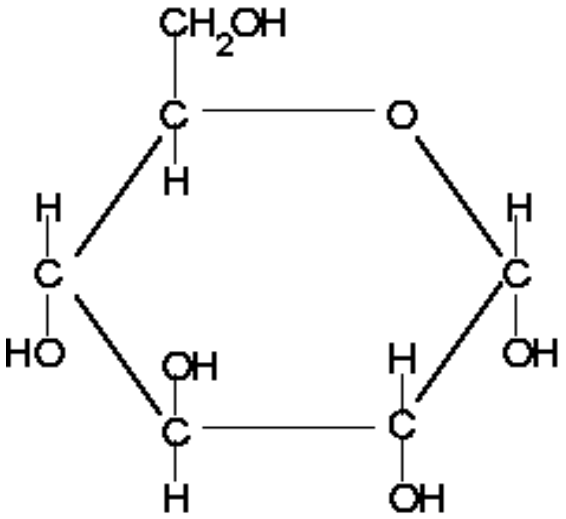
Designed by: Mohsen Ebrahimi (Assistant Professor Of Semnan University)

انواع کربوهیدرات

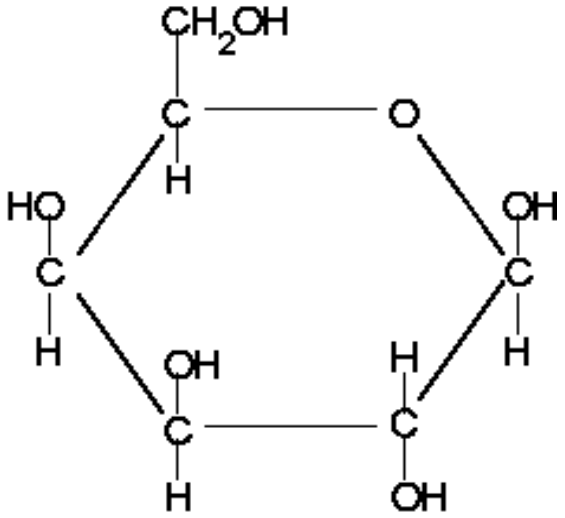
- ✓ منوساکارید (۱)
- ✓ دی ساکارید (۲)
- ✓ الیگوساکارید (۲-۱۰)
- ✓ پلی ساکارید (۱۰<)

Designed by: Mohsen Ebrahimi (Assistant Professor Of Semnan University)

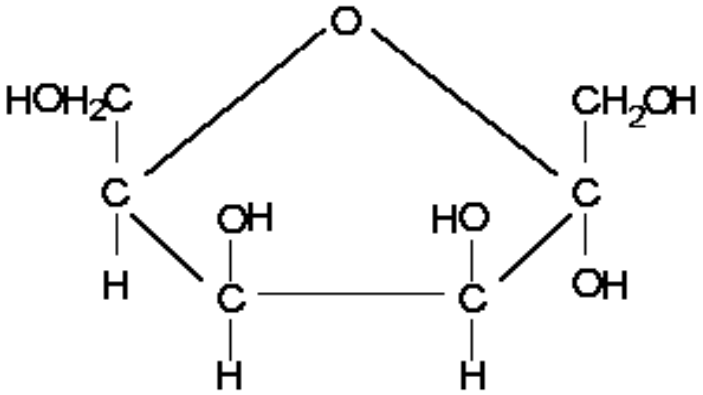
monisaccharide



Glucose

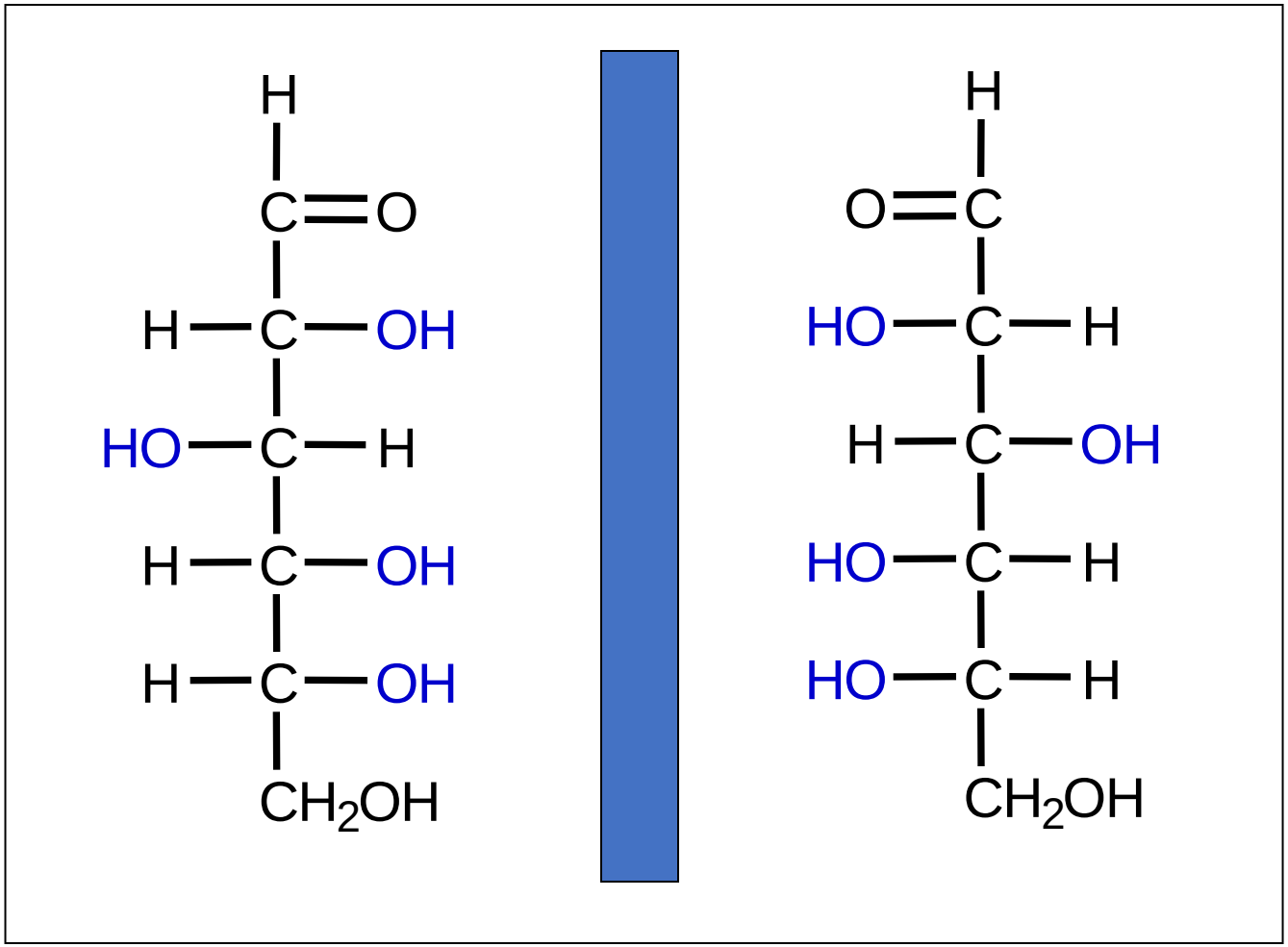


Galactose



Fructose

Mirror Image of Glucose



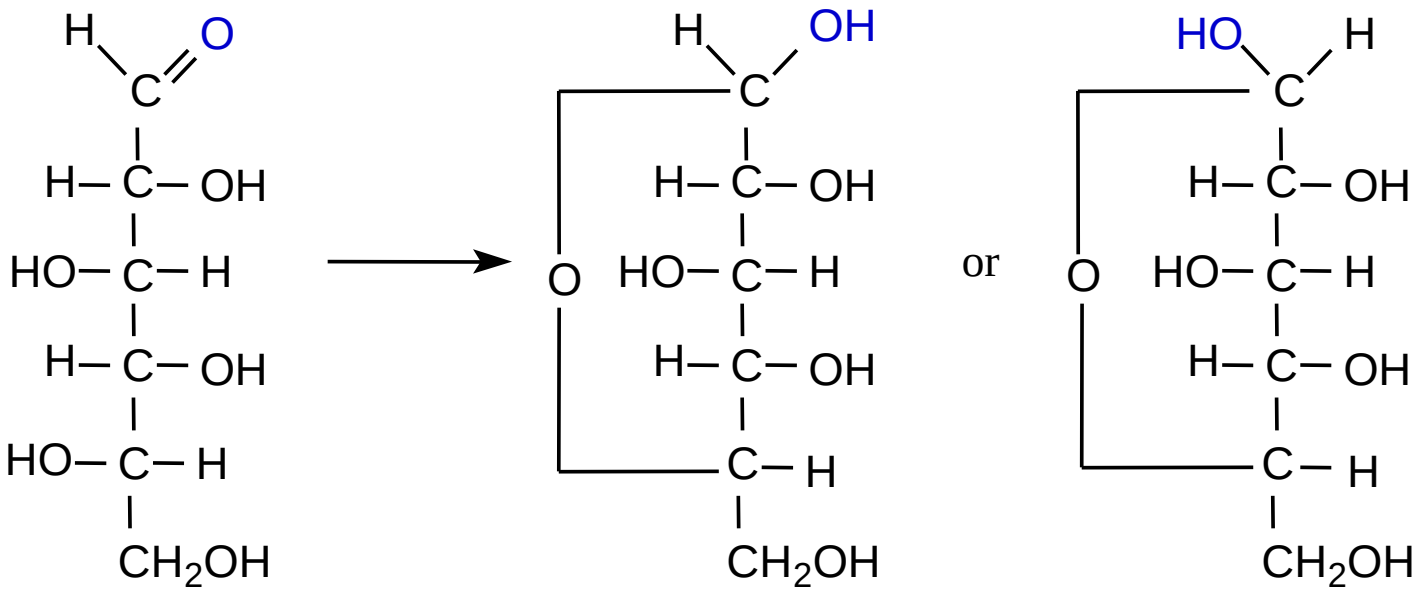
D-glucose

L-glucose

Designed by: Mohsen Ebrahimi (Assistant Professor Of Semnan University)

ANOMERS

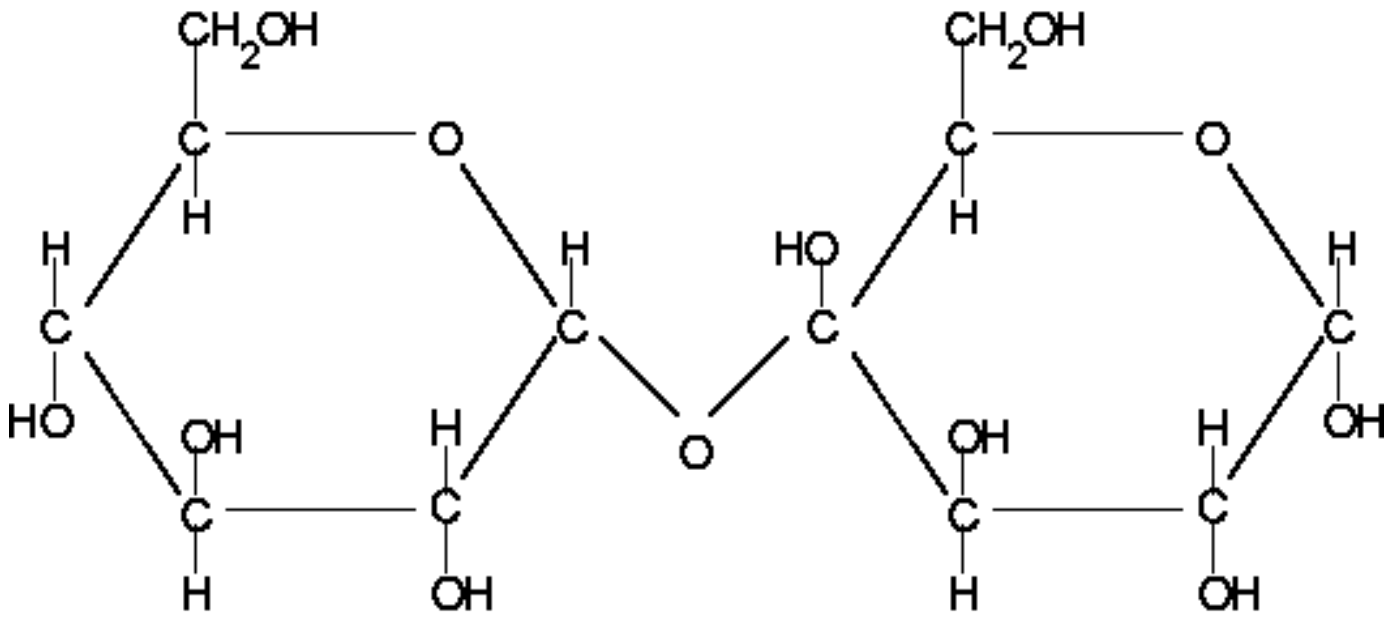
Stereoisomers formed when ring is formed (α, β).



β α

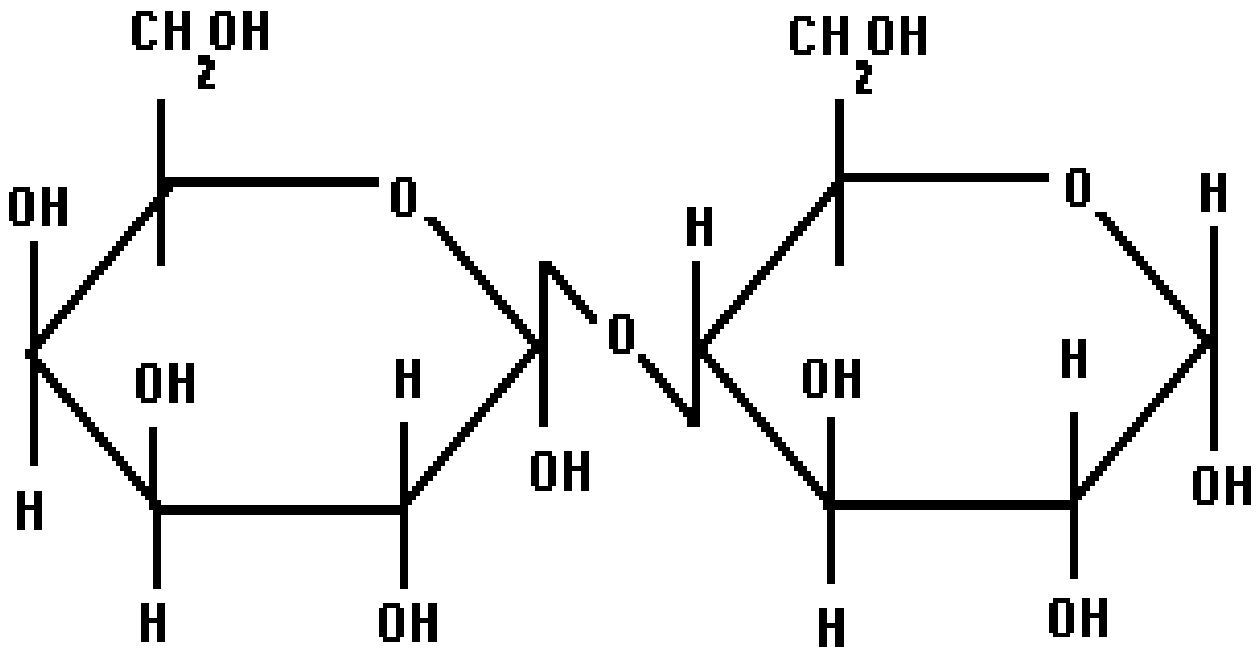
disaccharide

maltose

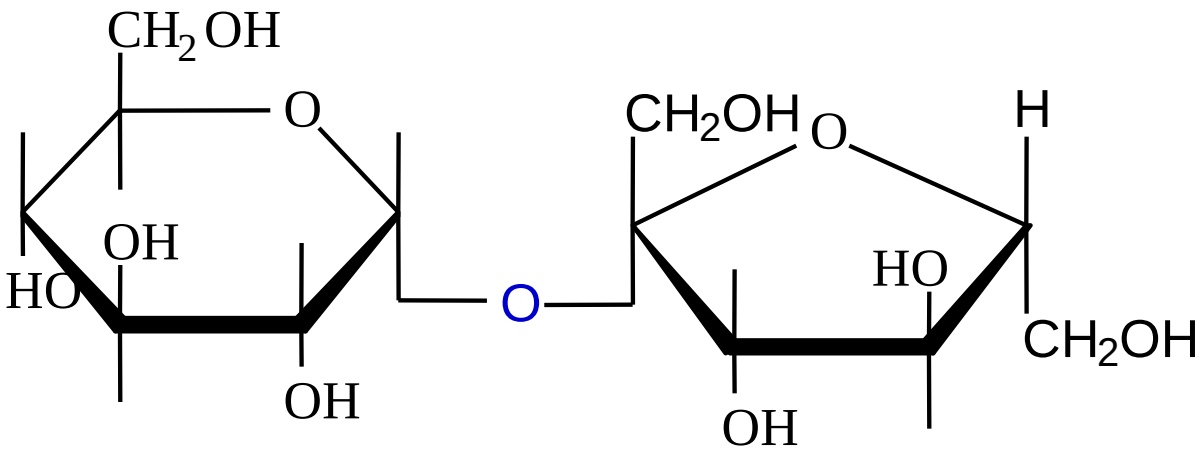


Maltose
(A compound of 2 glucose molecules)

lactose


CH2OH
OH
O
OH
H
H
OH
H
OH
O
CH2OH
H
O
H
OH
H
H
OH
OH
Galactose
Glucose

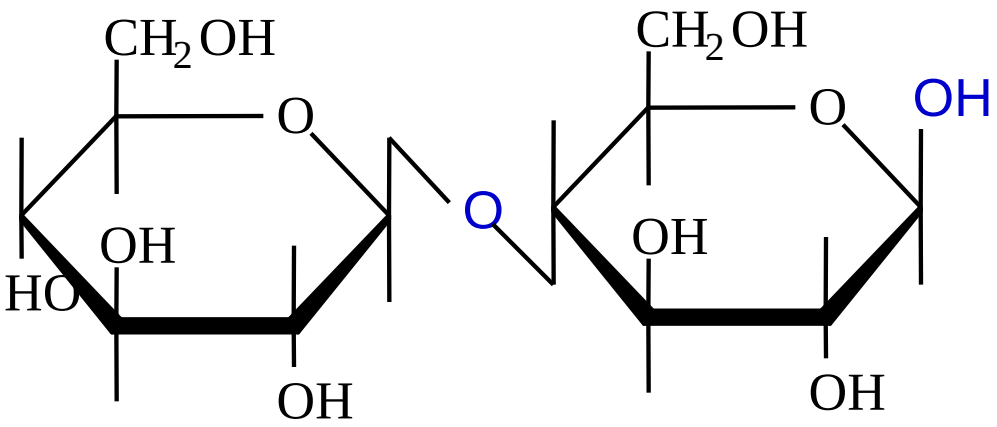
sucrose



Glucose **fructose**

CELLOBIOSE

β-D-Glucopyranosyl -β-D-Glucopyranose

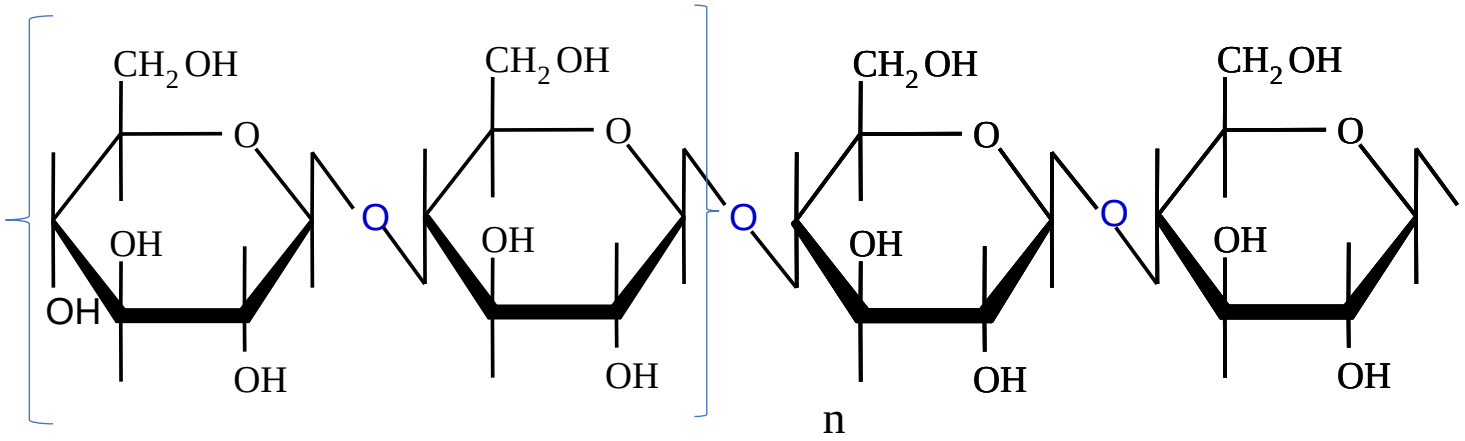


polysaccharide

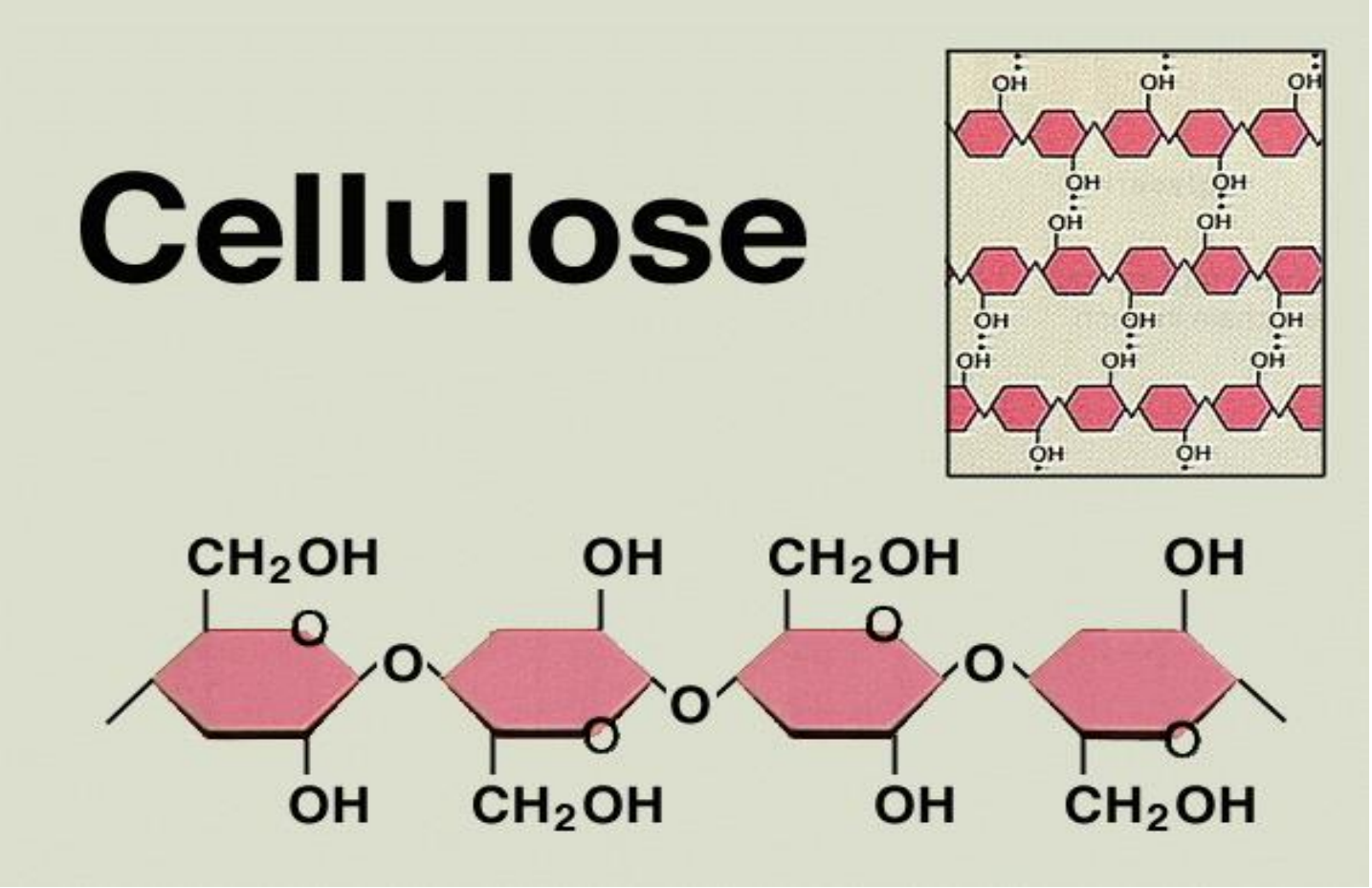
CELLULOSE

Polymer of β-D-Glucose (1, 4) linkage.

Repeating cellobiose moiety.



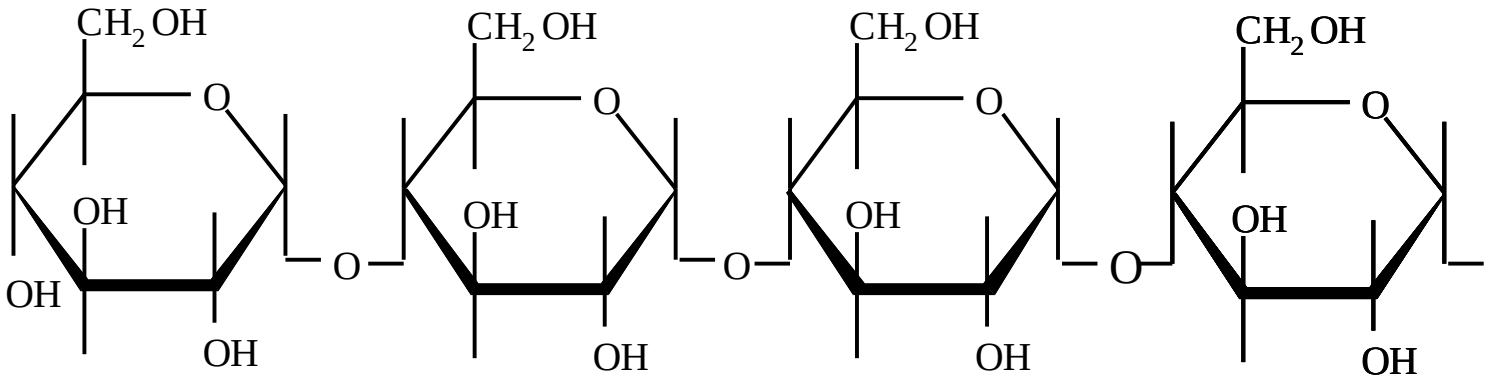
Cellulose



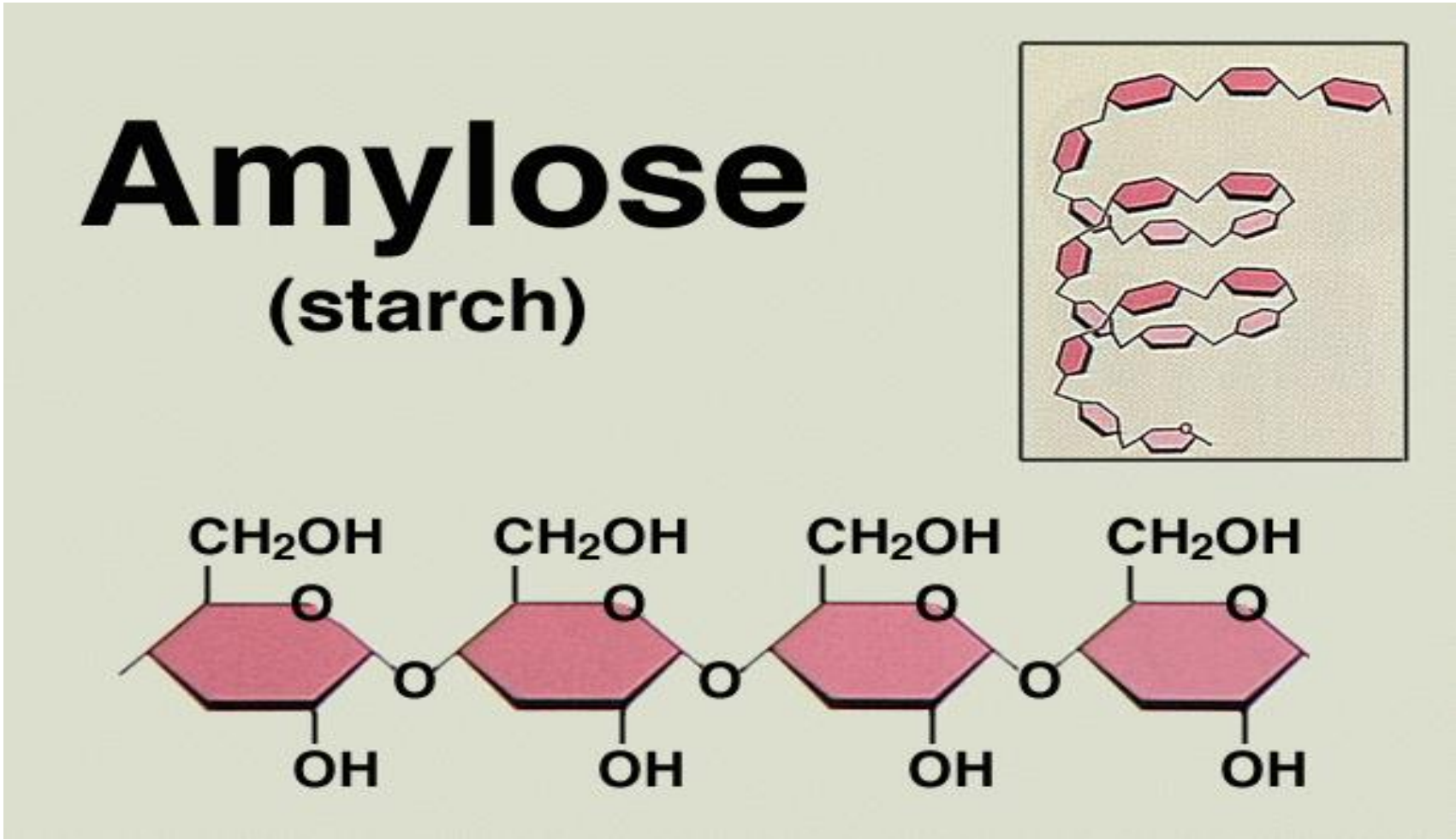
STARCH

The reserve carbohydrate of plants. Occurs as granules in the cell.

Made of amylose and amylopectin.



Amylose



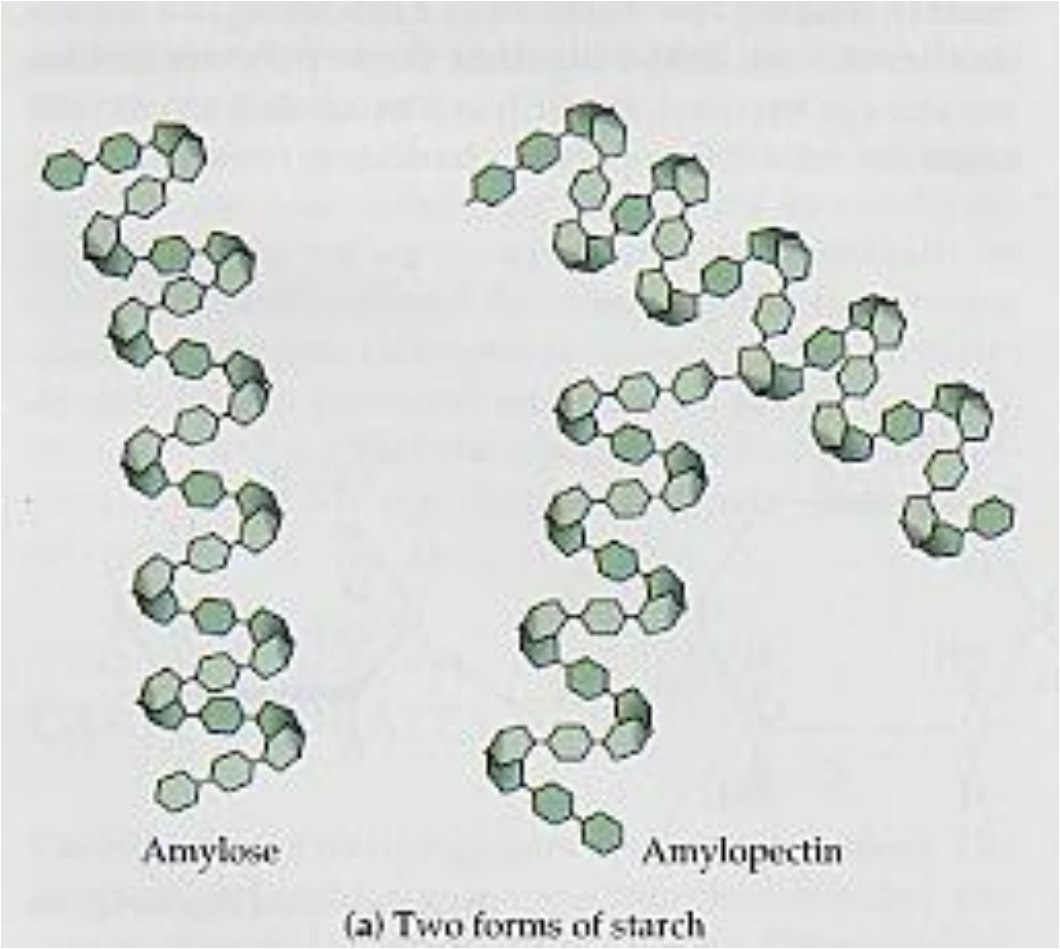
AMYLOPECTIN

Polymer of α-D-Glucose (1->4) linkage in addition to α-D-Glucose (1–>6) linkage.

The length of linear units in amylopectin is only 25.

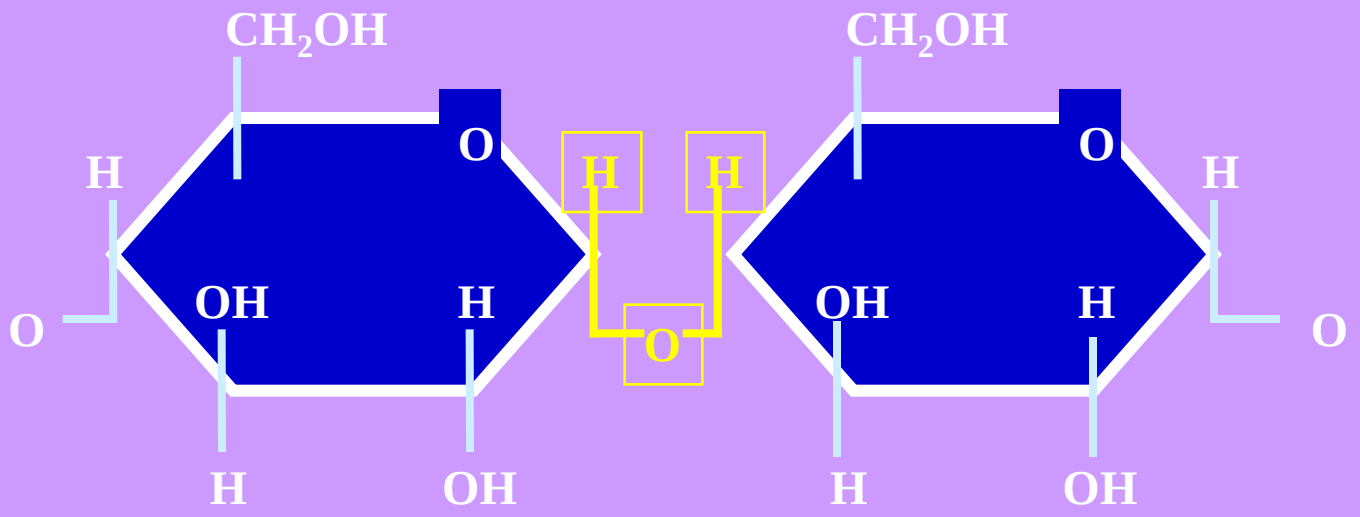
α-(1–>4) linkage (25) to α-(1–>6) linkage.

Amylose and Amylopectin

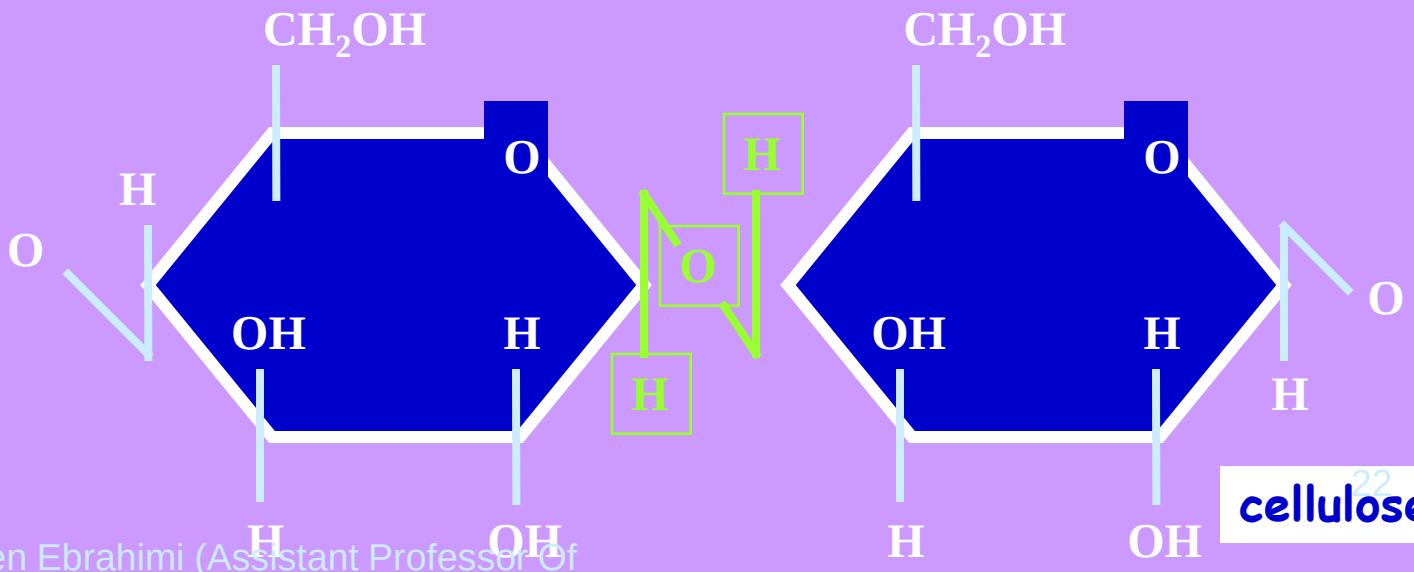


(a) Two forms of starch

Starch and Cellulose



starch



cellulose

Designed by: Mohsen Ebrahimi (Assistant Professor Of

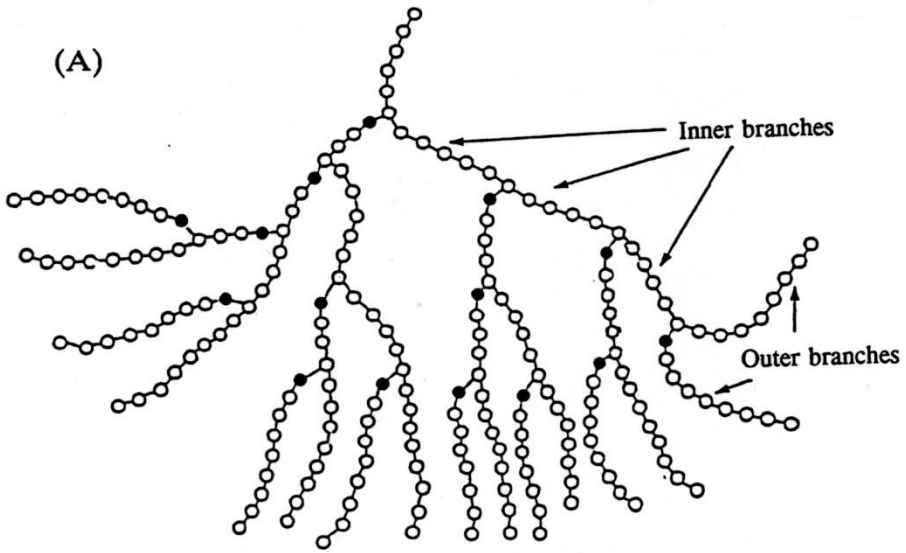
GLYCOGEN

Animal starch.

α - (1 –> 4) linkage and α - (1 -> 6) linkage

12 : 1

Glycogen



جمع بندی

- کربوهیدرات ها
  - منوساکارید ها
    - گلوکز(قند خون)
    - گالاکتور
    - فروکتوز(قند میوه)
  - دی ساکارید ها
    - مالتوز (قند آبجو)
    - لاکتوز(قند شیر)
    - ساکاروز(قند نیشکر)
    - سلوبیوز
  - پلی ساکارید ها
    - سلولز(ماده اصلی فیبرها)
    - نشاسته(منبع ذخیره کربوهیدرات در گیاهان)
    - گلیکوژن(منبع ذخیره کربوهیدرات در جانوران)

Designed by: Mohsen Ebrahimi (Assistant Professor Of Semnan University)

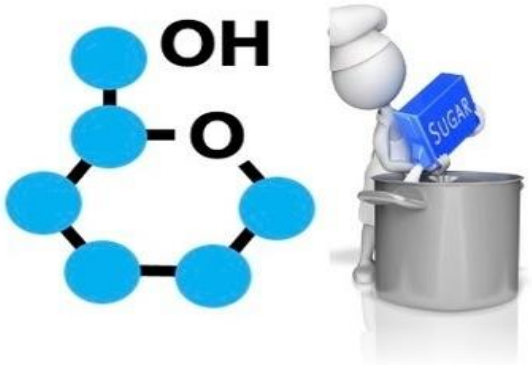
What is sugar?

mysportscience
Unlock the Power of Science to Optimise Performance

@jeukendrup

www.mysportscience.com

Glucose is a carbohydrate with the formula $C_6H_{12}O_6$



Sugars are small carbohydrates

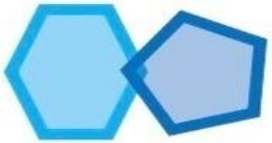
Not all sugars are fast! Sugars can be fast or slow (fructose and galactose).

Most common sugars:

Glucose (grape sugar)

Maltose (malt sugar)

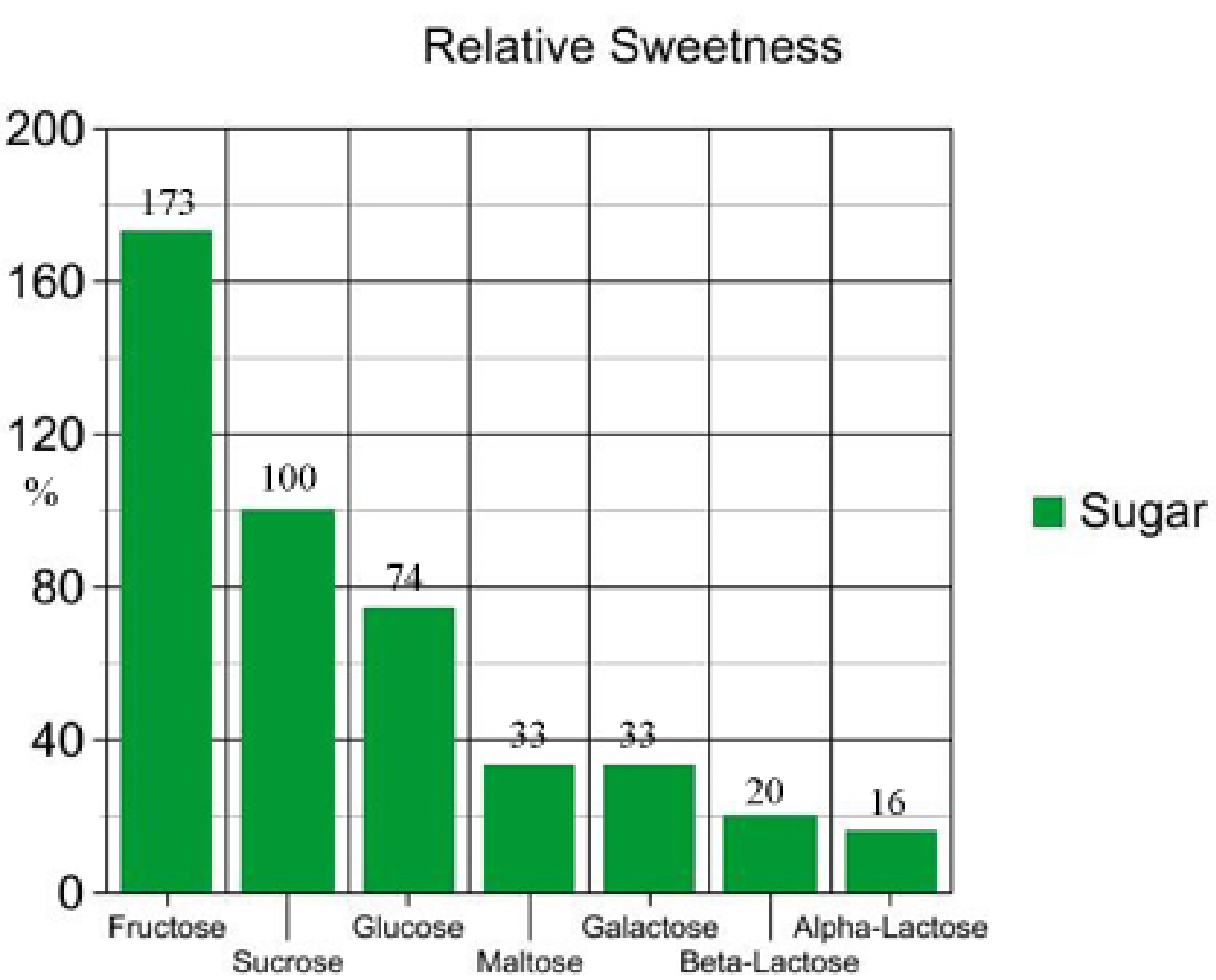
Fructose (fruits sugar)



Sucrose (table sugar)

Galactose

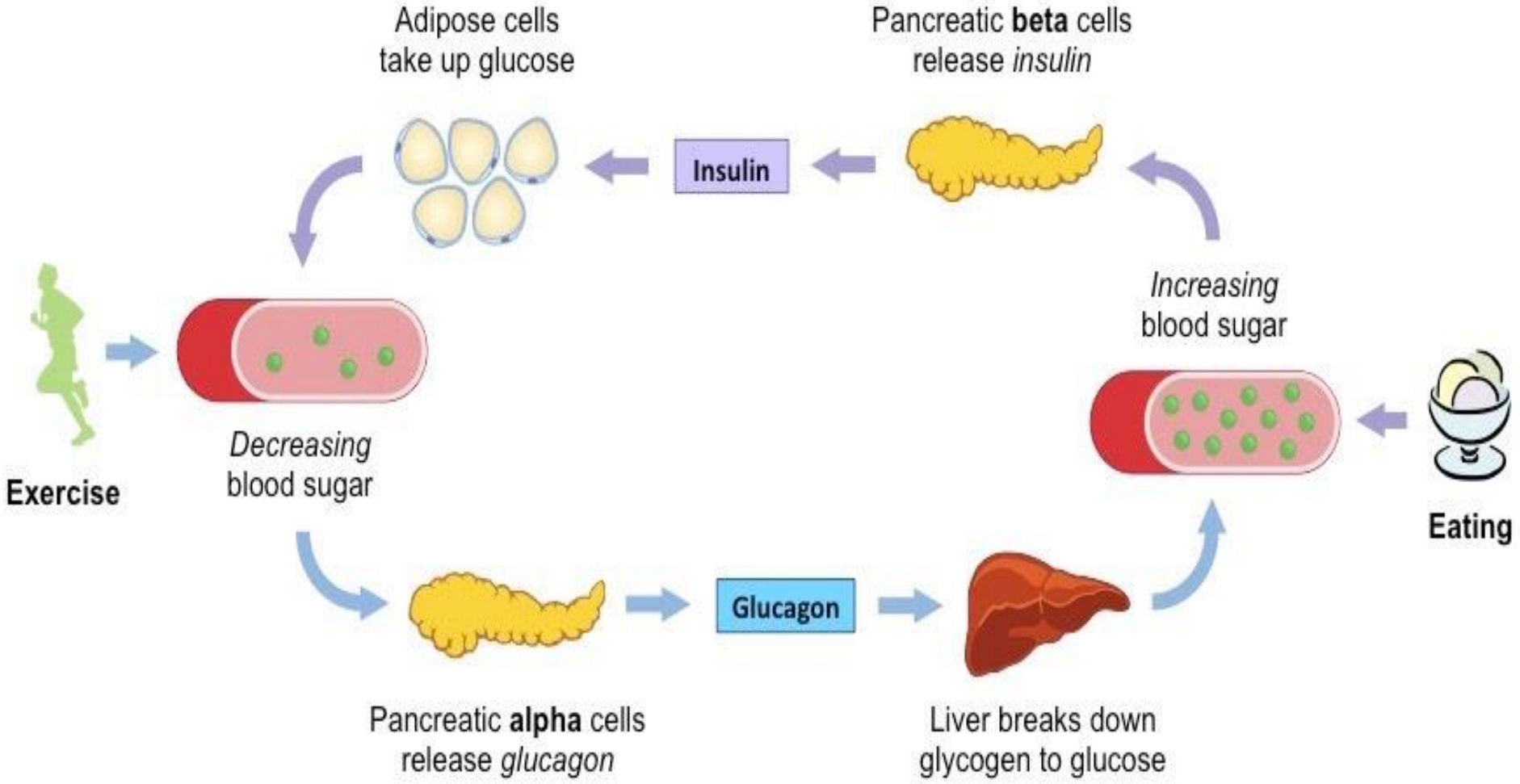
Lactose (milk sugar)


Relative Sweetness
200
160
120
%
80
40
0
173
100
74
33
33
20
16
Fructose
Sucrose
Glucose
Maltose
Galactose
Beta-Lactose
Alpha-Lactose
Sugar

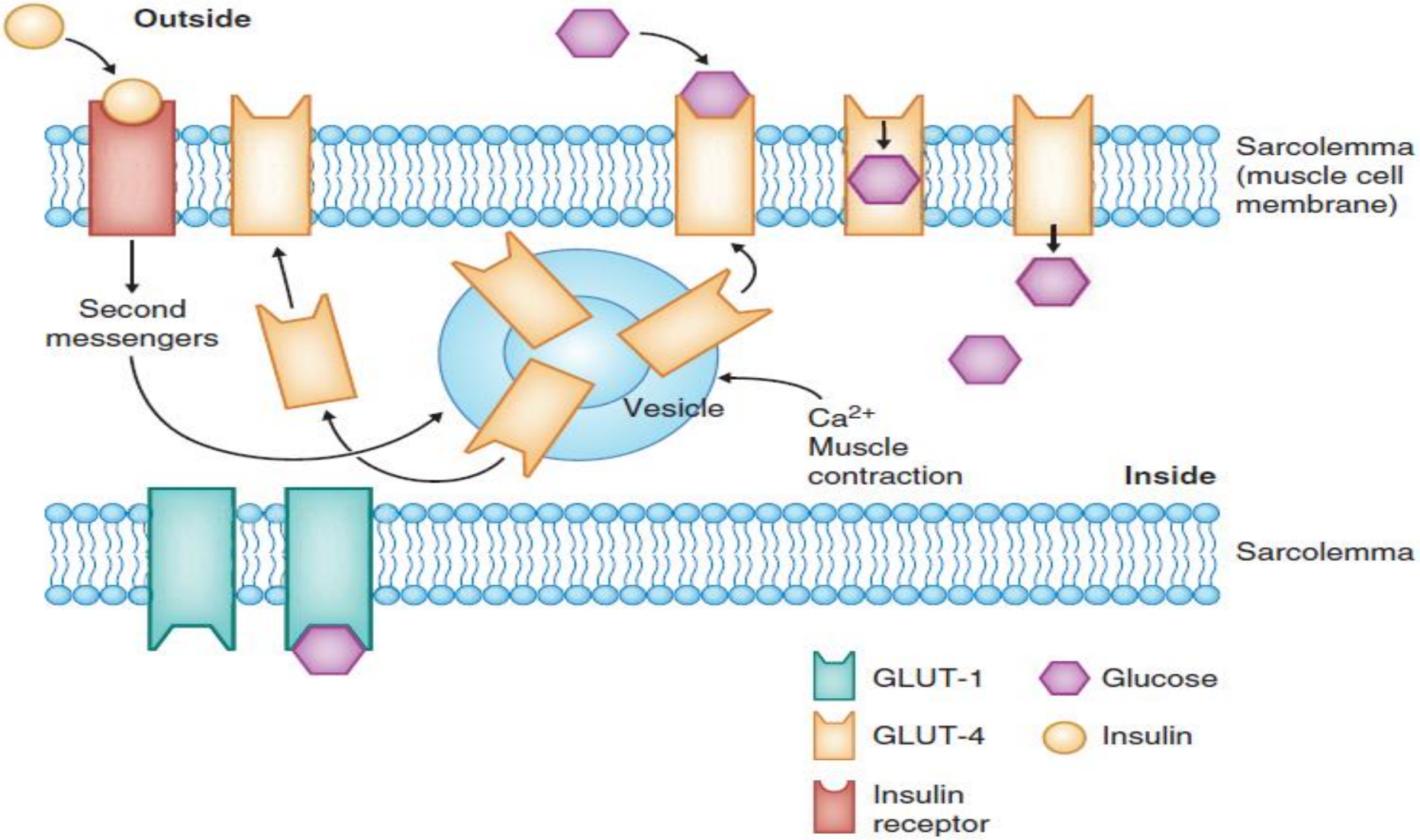
هضم کربوهیدرات

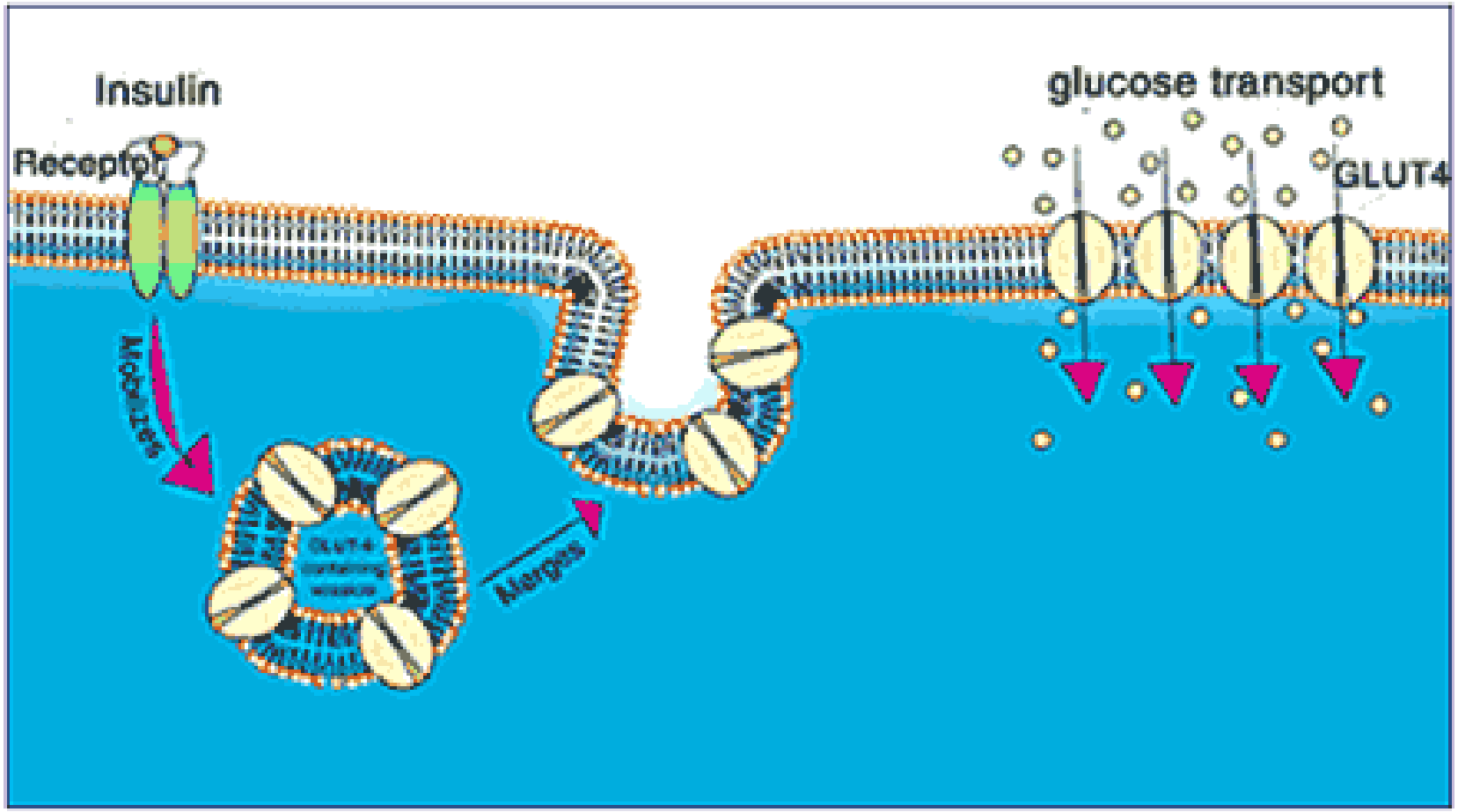
- از رژیم غذایی (نشاسته، گلوکز و ...) ✓
- هضم نشاسته در دهان و روده کوچک توسط آلفاآمیلاز و تجزیه آن به گلوکز (هیدرولیز پیوندهای ۱و۴ گلیکوزیدی آمیلوز و آمیلوپکتین) ✓
- تجزیه ساکاروز در سطح خارجی ریزپرزهای روده توسط آنزیم ساکاراز به گلوکز و فروکتوز ✓
- از طریق ورید باب به کبد ✓

Designed by: Mohsen Ebrahimi (Assistant Professor Of Semnan University)

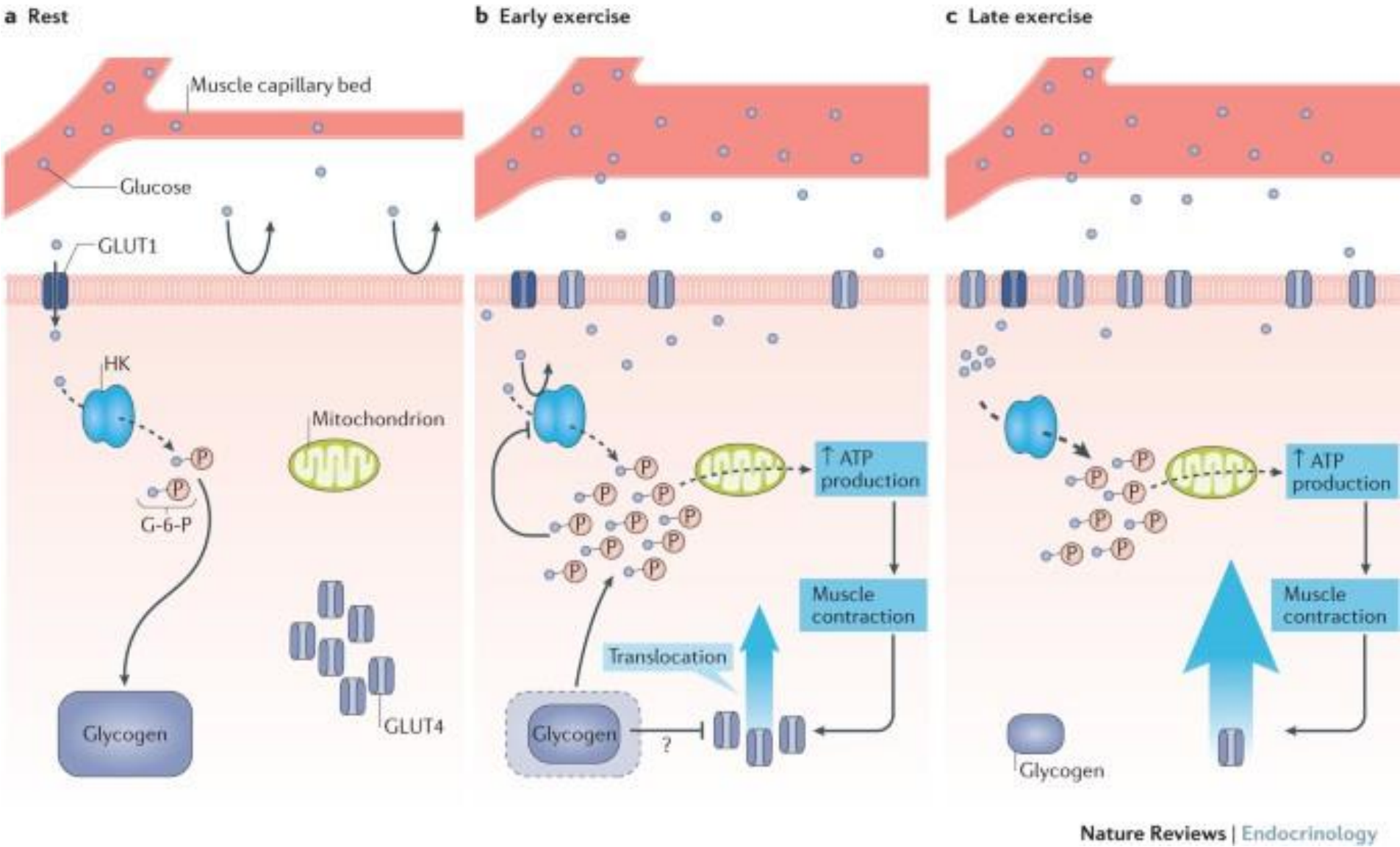

Adipose cells
take up glucose
Pancreatic **beta** cells
release *insulin*
Insulin
Exercise
Decreasing
blood sugar
Increasing
blood sugar
Eating
Glucagon
Pancreatic **alpha** cells
release *glucagon*
Liver breaks down
glycogen to glucose

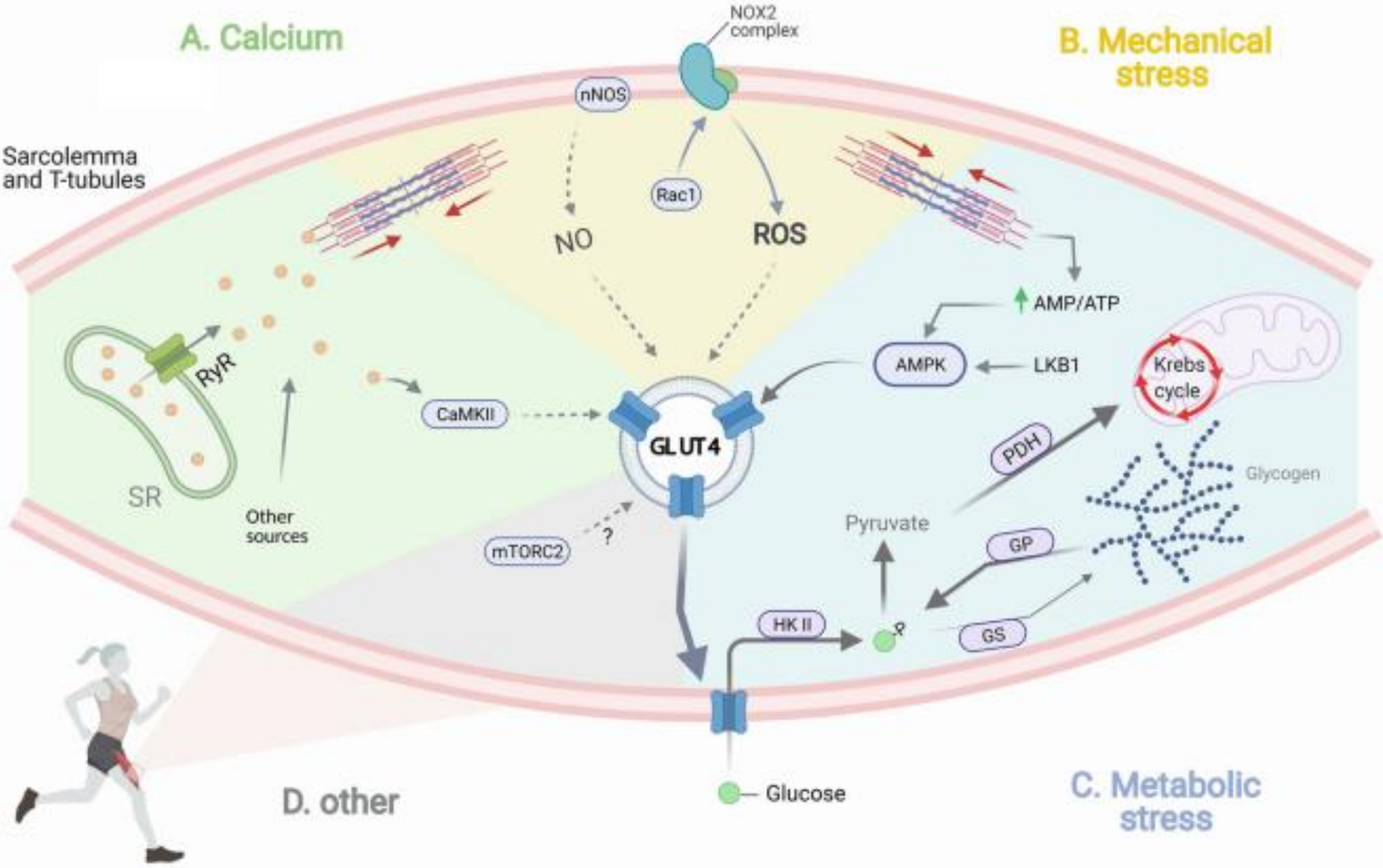
انتقال گلوکز به داخل سلول



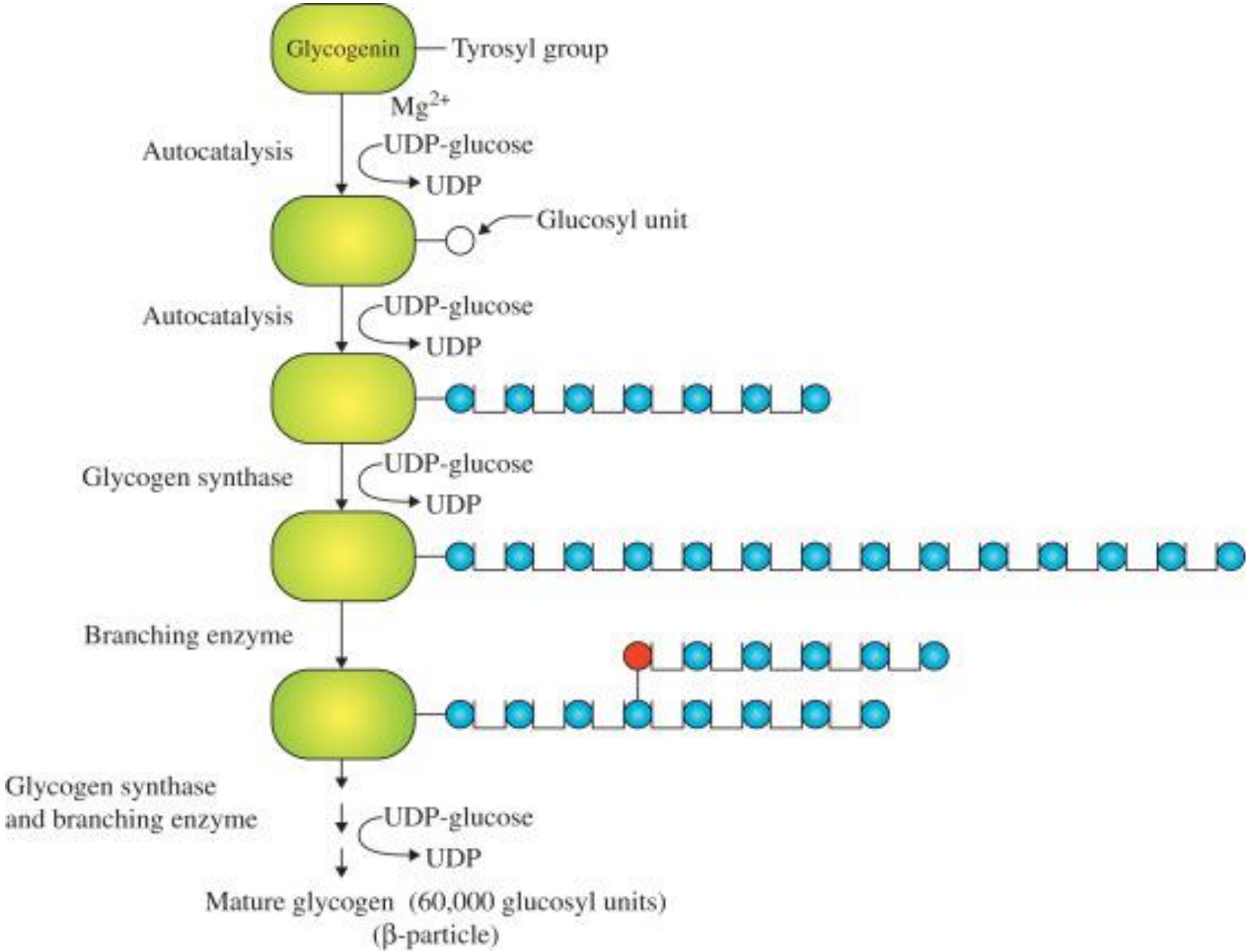


در دیابتی ها ؟


a Rest
Muscle capillary bed
Glucose
GLUT1
HK
G-6-P
Mitochondrion
GLUT4
Glycogen
b Early exercise
↑ ATP production
Muscle contraction
Translocation
Glycogen
?
c Late exercise
↑ ATP production
Muscle contraction
Glycogen
Nature Reviews | Endocrinology

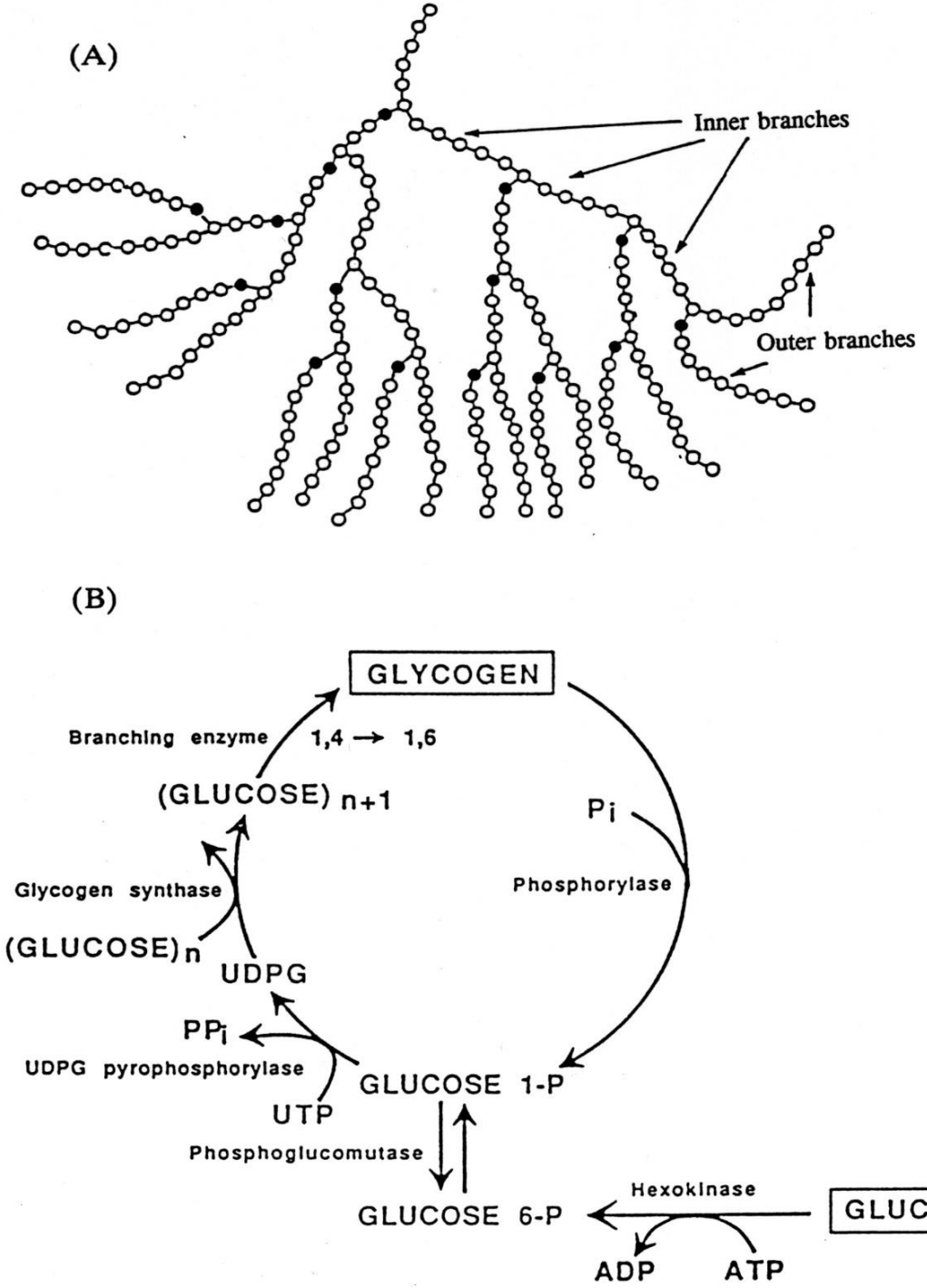

A. Calcium
B. Mechanical stress
C. Metabolic stress
D. other
NOX2 complex
nNOS
Rac1
NO
ROS
Sarcolemma and T-tubules
RyR
SR
Other sources
CaMKII
GLUT4
mTORC2
?
AMP/ATP
AMPK
LKB1
Krebs cycle
PDH
Pyruvate
Glycogen
GP
GS
HK II
P
Glucose

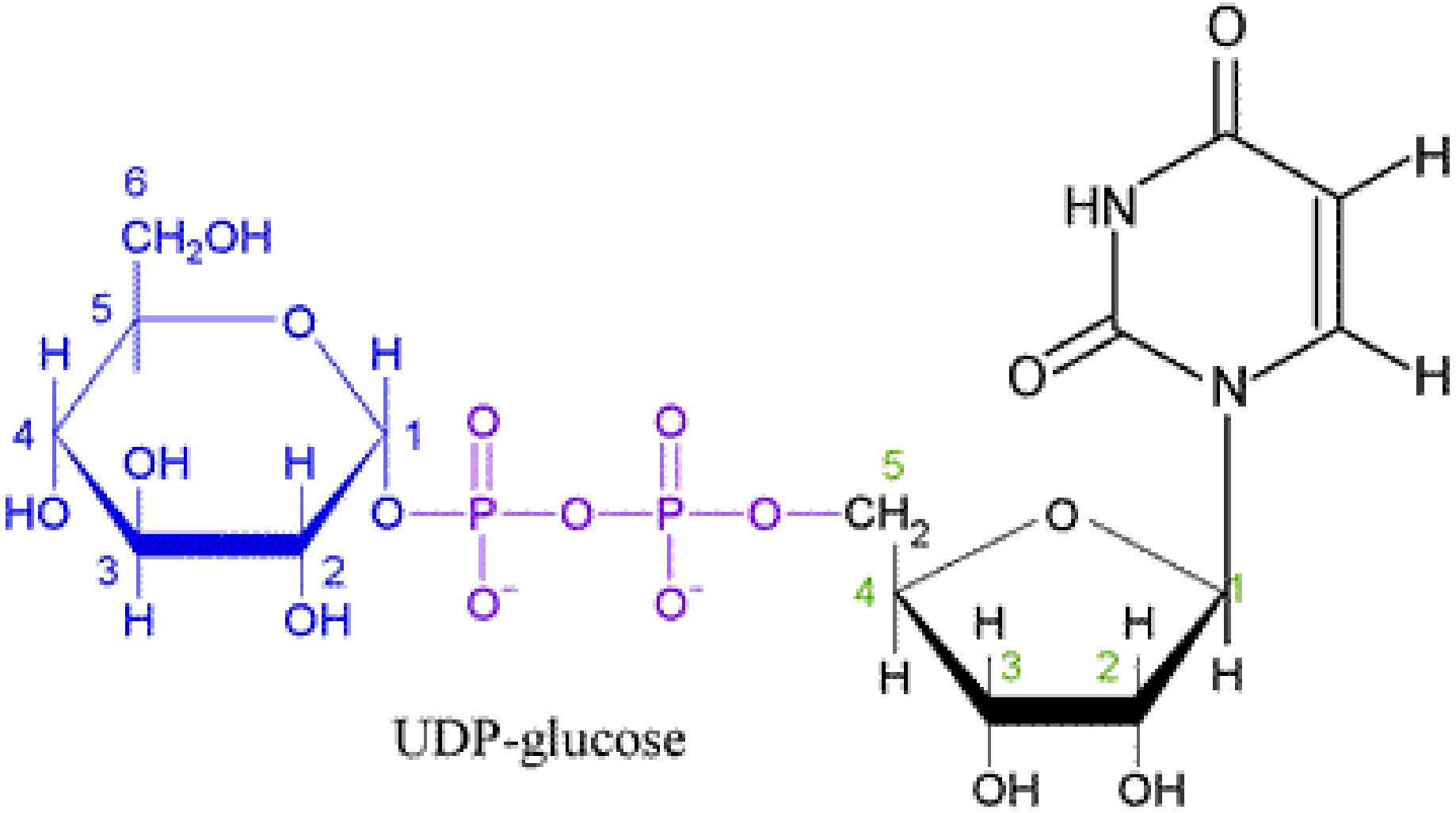
ساخت گلیکوژن



Designed by: Mohsen Ebrahimi (Assistant Professor Of Semnan University)

گلیکوژنز

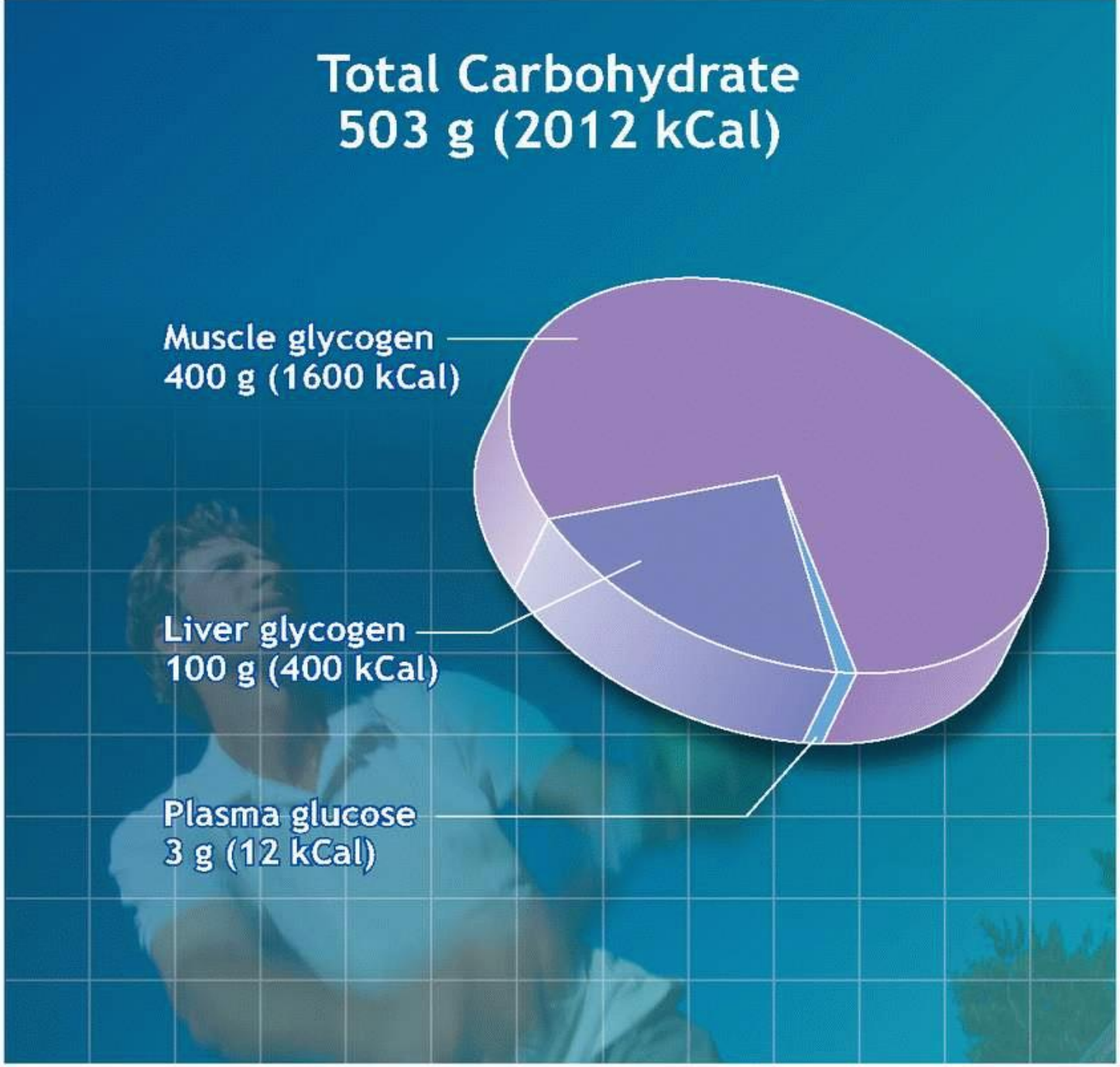

(A)
Inner branches
Outer branches
(B)
GLYCOGEN
Branching enzyme
1,4 → 1,6
(GLUCOSE) n+1
Pi
Phosphorylase
Glycogen synthase
(GLUCOSE) n
UDPG
PPi
UDPG pyrophosphorylase
GLUCOSE 1-P
UTP
Phosphoglucomutase
Hexokinase
GLUCOSE
GLUCOSE 6-P
ADP
ATP


UDP-glucose

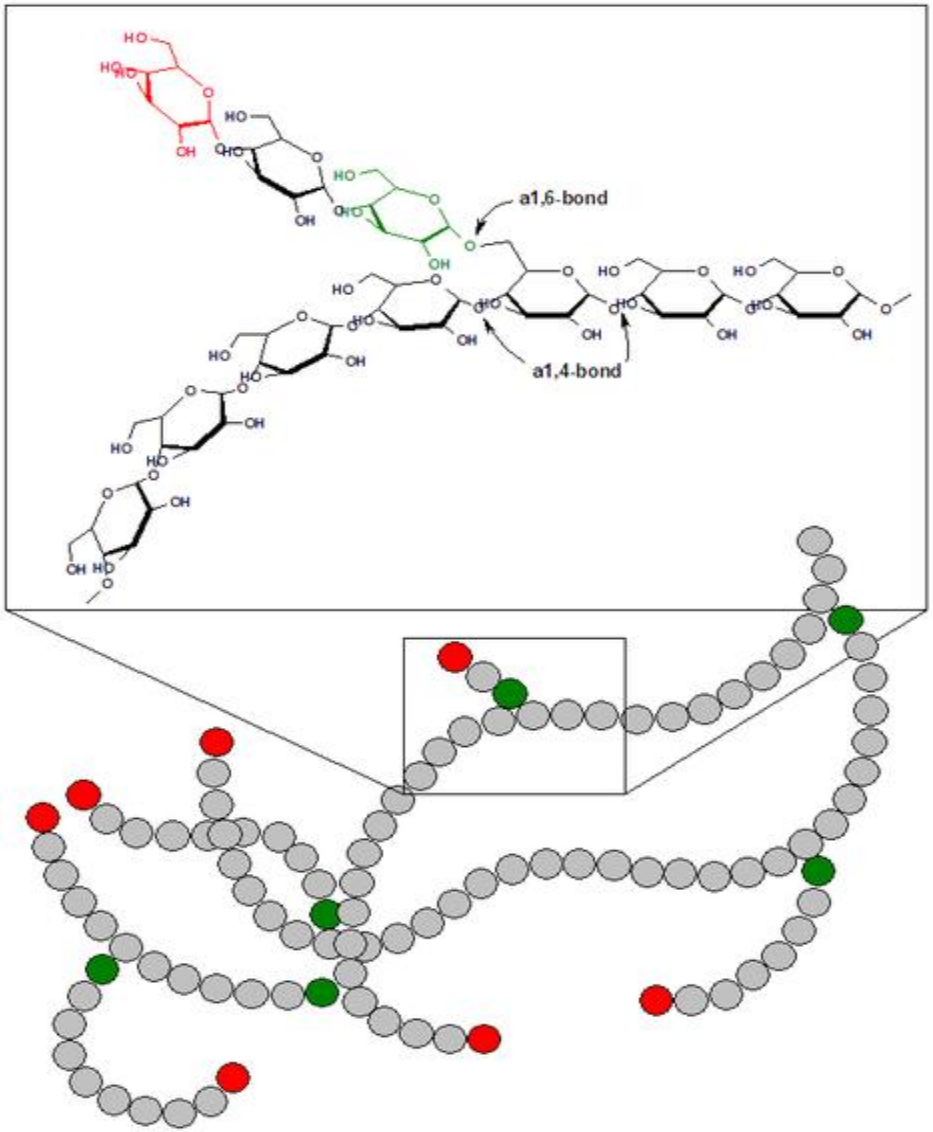
ذخایر کربوهیدرات بدن

- ✓ گلیکوژن کبد (حدود ۳۰۰ تا ۳۵۰ میلی مول به ازای هرکیلوگرم وزن تر) در حدود ۱۰۰ گرم
- ✓ گلیکوژن عضله (حدود ۱۵۰ تا ۲۵۰ میلی مول به ازای هرکیلوگرم وزن تر) در حدود ۳۰۰ گرم
  - • گرانولهای ۱۰ تا ۴۰ نانومتری در سیتوزول
- ✓ گلوکز خون (حدود ۵ گرم در کل خون)

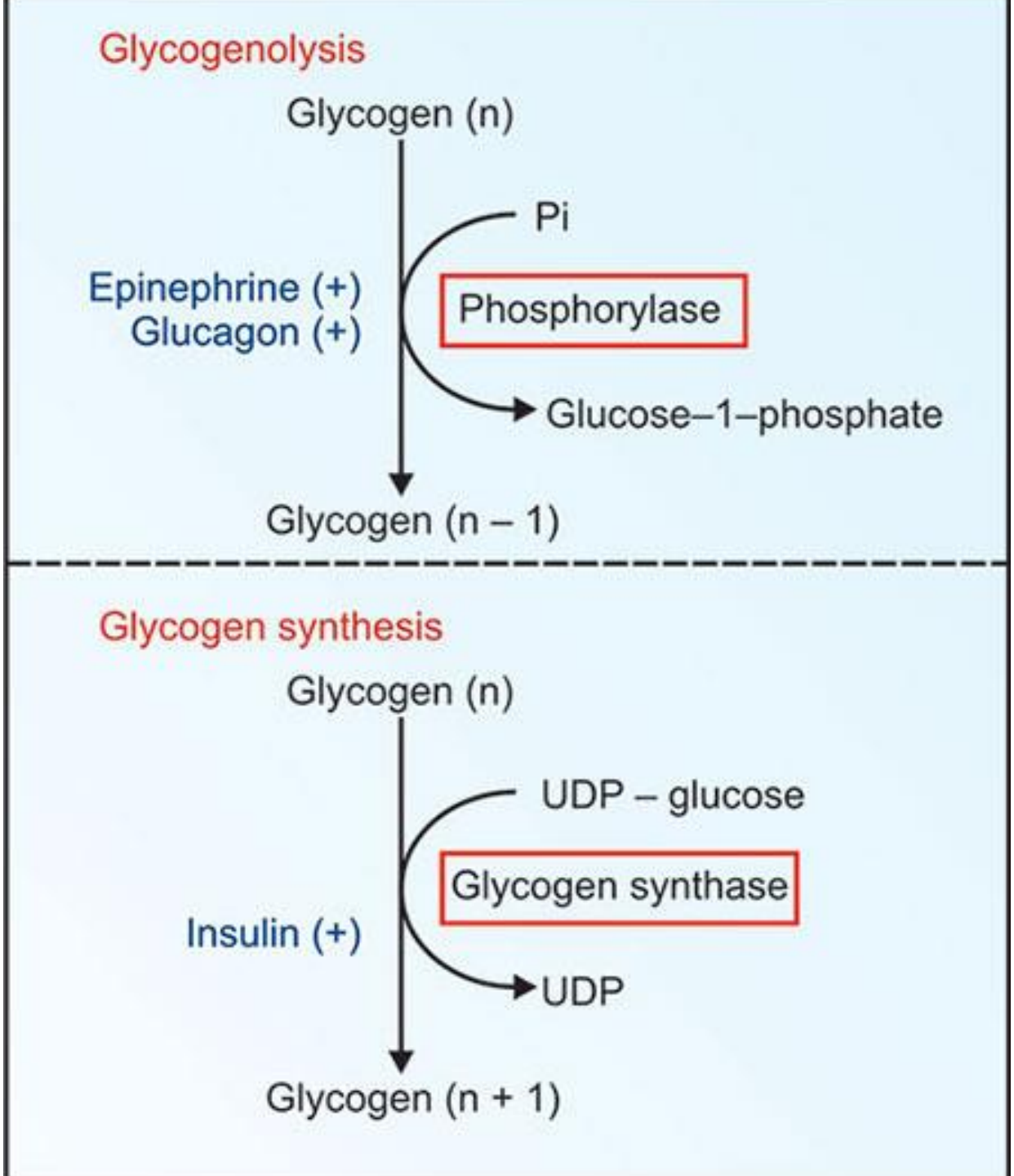
Designed by: Mohsen Ebrahimi (Assistant Professor Of Semnan University)


Total Carbohydrate
503 g (2012 kCal)
Muscle glycogen
400 g (1600 kCal)
Liver glycogen
100 g (400 kCal)
Plasma glucose
3 g (12 kCal)

گلیکوژنولیز



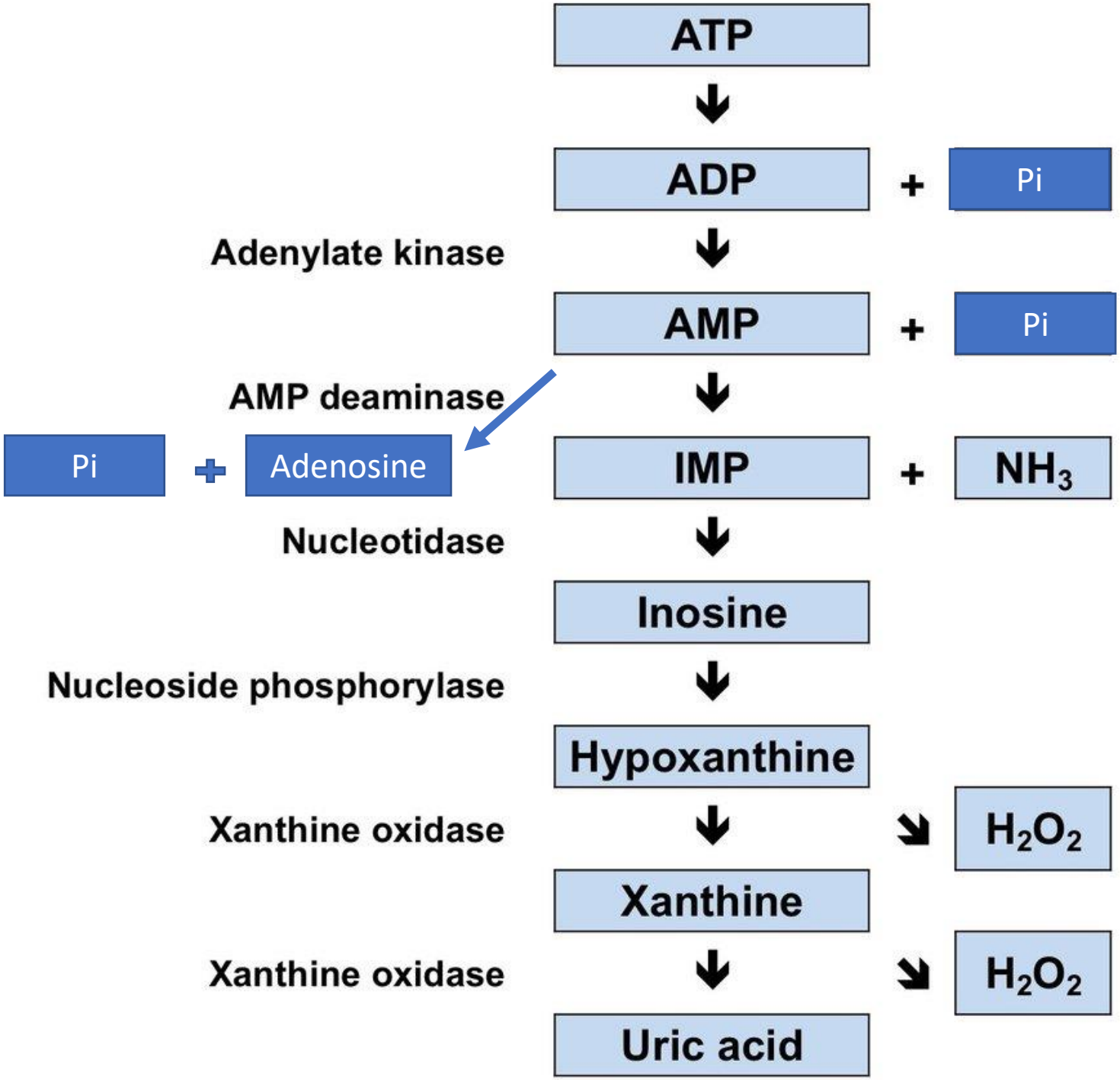
- ✓آنزیم فسفوریلاز (پیوندهای ۴-۱ آلفا)
- ✓آنزیم شاخه شکن (پیوندهای ۶-۱ آلفا)


Glycogenolysis
Glycogen (n)
Pi
Epinephrine (+)
Glucagon (+)
Phosphorylase
Glucose–1–phosphate
Glycogen (n – 1)
Glycogen synthesis
Glycogen (n)
UDP – glucose
Glycogen synthase
Insulin (+)
UDP
Glycogen (n + 1)

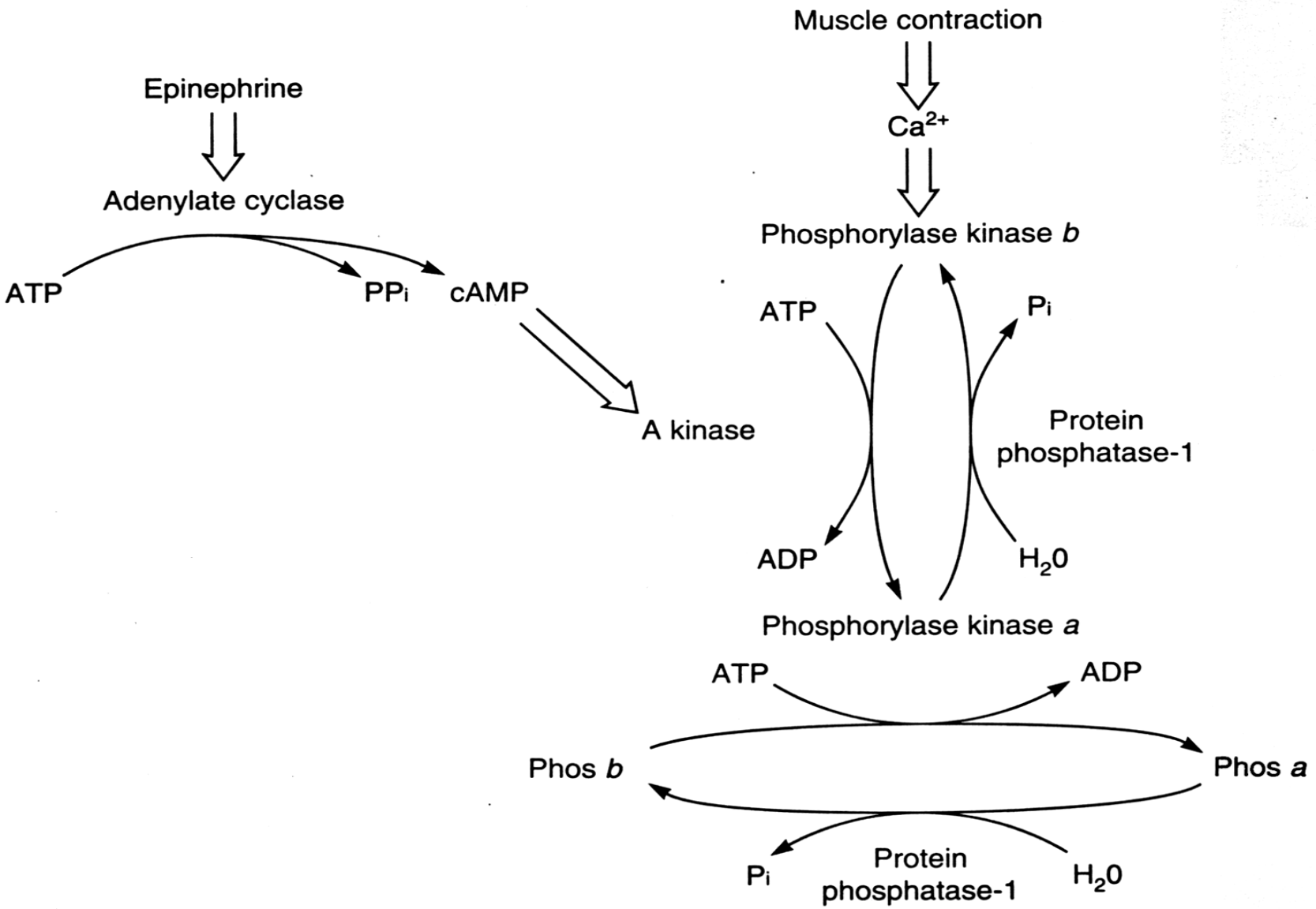
عوامل موثر بر گلیکوژنولیز در ورزش

- ✓ افزایش Pi
  - (فسفوریلاز b را به a تبدیل می کند)
- ✓ افزایش IMP و AMP؛ کاهش ATP
  - IMP و AMP، فعال کننده آلوستری فسفوریلاز هستند
- ✓ افزایش Ca^{2+}
  - اتصال کلسیم به فسفوریلاز کیناز (کالمودولین) و فعال کردن آن
- ✓ افزایش اپی نفرین
  - از طریق آبشار cAMP

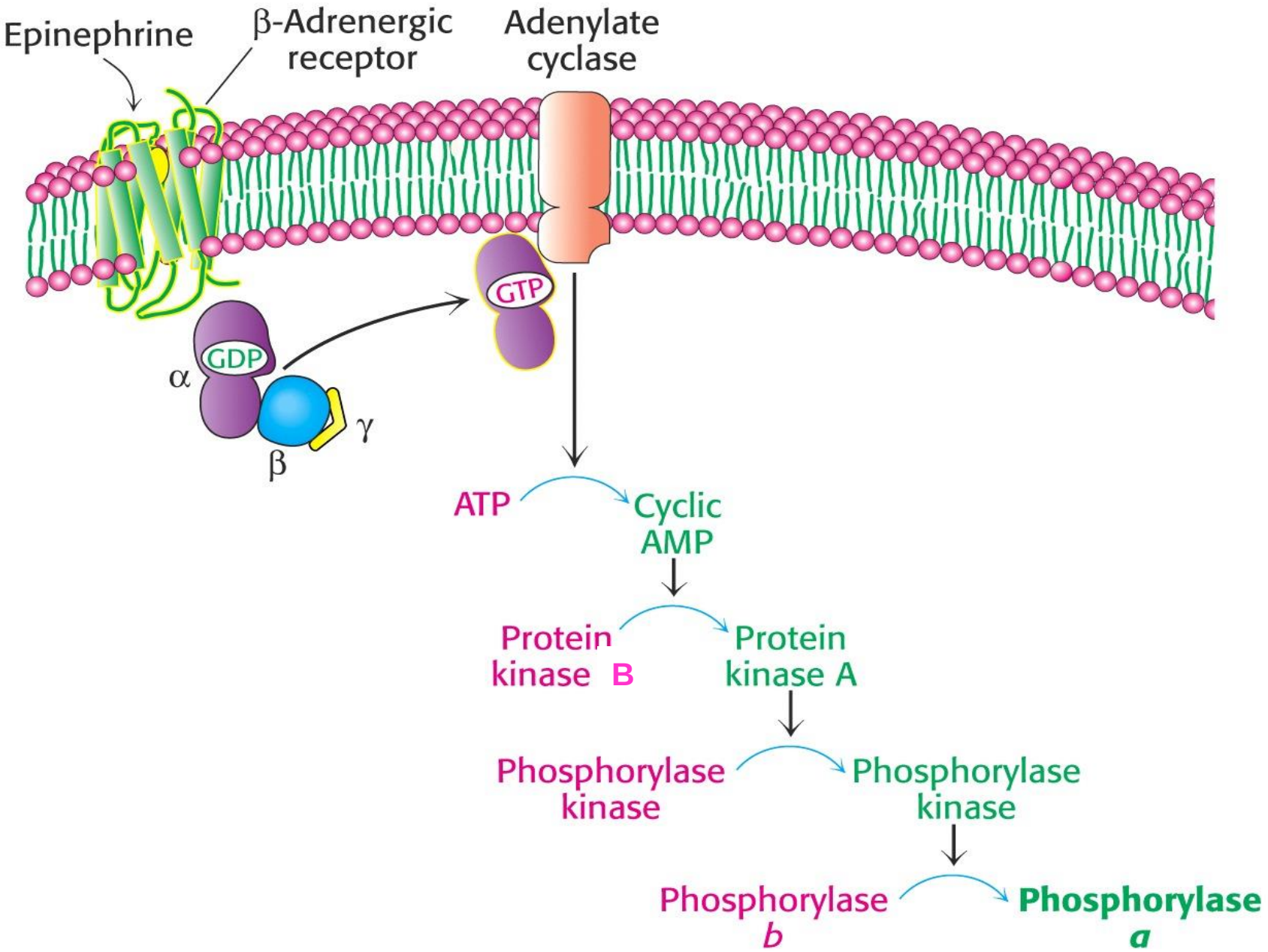
Designed by: Mohsen Ebrahimi (Assistant Professor Of Semnan University)

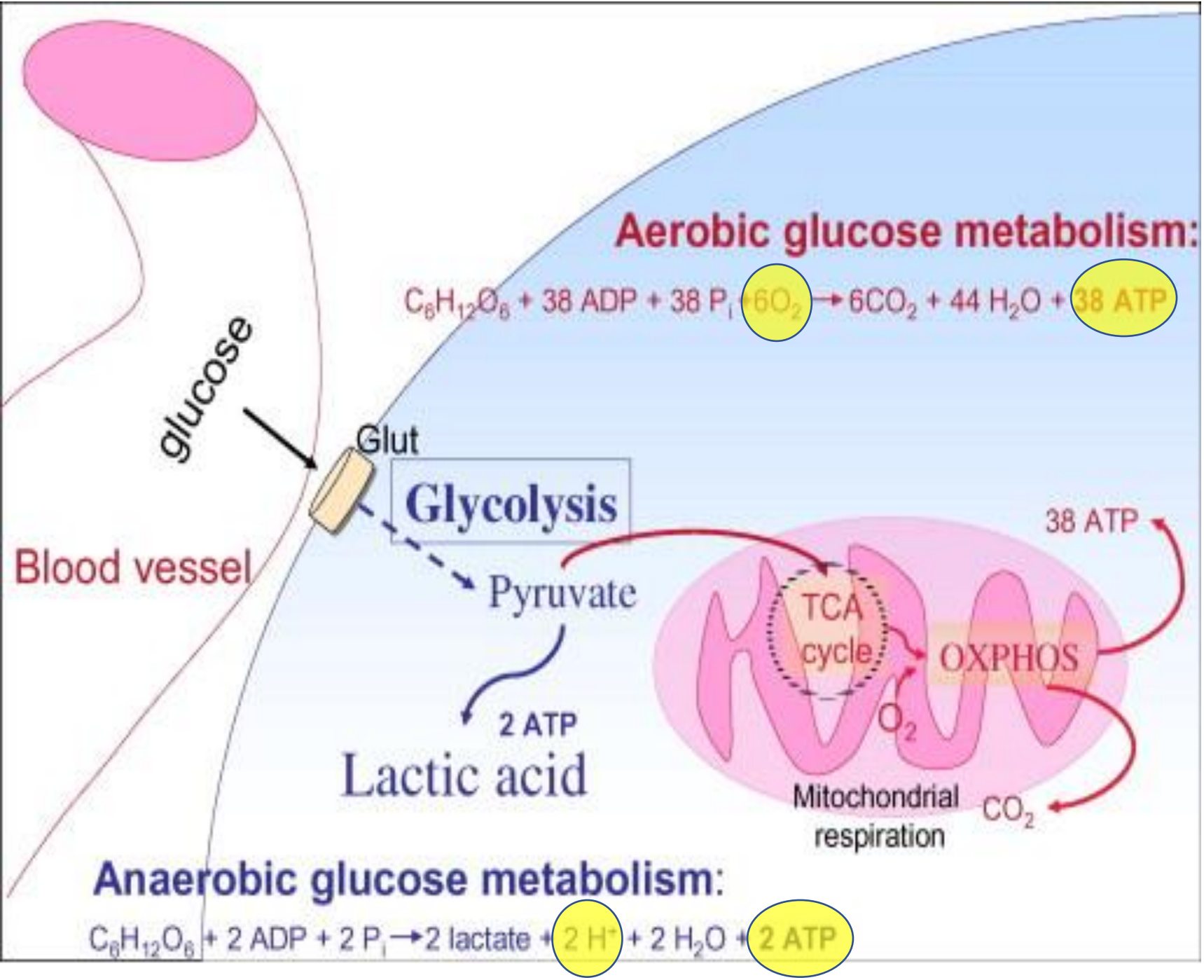

ATP
ADP
+
Pi
Adenylate kinase
AMP
+
Pi
AMP deaminase
Pi
+
Adenosine
IMP
+
NH_3
Nucleotidase
Inosine
Nucleoside phosphorylase
Hypoxanthine
Xanthine oxidase
H_2O_2
Xanthine
Xanthine oxidase
H_2O_2
Uric acid

فعال شدن فسفوریلاز با اپی نفرین و Ca2+



حلقوی AMP آبشار




Aerobic glucose metabolism:
$C_6H_{12}O_6 + 38\ ADP + 38\ P_i + 6O_2 \rightarrow 6CO_2 + 44\ H_2O + 38\ ATP$
glucose
Glut
Glycolysis
Blood vessel
Pyruvate
38 ATP
TCA cycle
OXPHOS
O_2
2 ATP
Lactic acid
Mitochondrial respiration
CO_2
Anaerobic glucose metabolism:
$C_6H_{12}O_6 + 2\ ADP + 2\ P_i \rightarrow 2\ lactate + 2\ H^+ + 2\ H_2O + 2\ ATP$

گلیکولیز

- ✓مسیر امبدن- میرهوف
- ✓بی هوازی
- ✓۱۰ واکنش
- ✓در سیتوزول روی می دهد

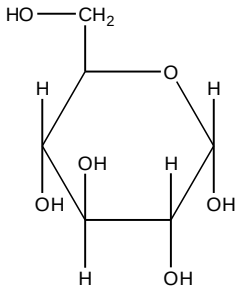
Designed by: Mohsen Ebrahimi (Assistant Professor Of Semnan University)

Glycolysis: Preparatory Phase

Glucose

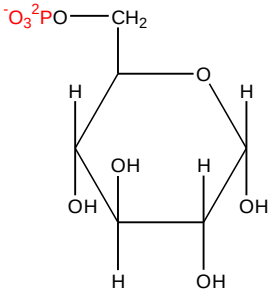
ATP → ADP (Mg^{2+})

Hexokinase (HK)



Glucose-6-phosphate

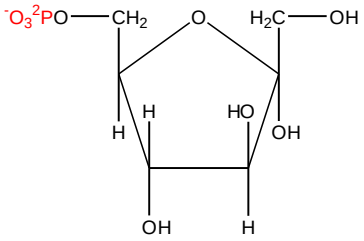
Phosphoglucose isomerase (PGI)



Fructose-6-phosphate

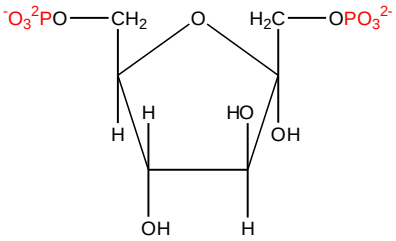
ATP → ADP (Mg^{2+})

Phosphofructokinase (PFK)

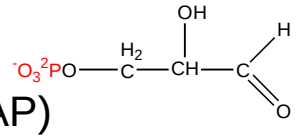


Fructose-1,6-bisphosphate

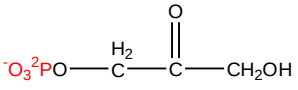
Aldolase



Glyceraldehyde-3-phosphate (GAP) ⇌ Dihydroxyacetone phosphate (DHAP)



GAP

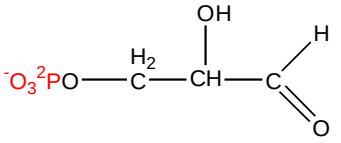


DHAP

Triose phosphate isomerase (TPI)

Glycolysis: Payoff Phase

Glyceraldehyde-3-phosphate (2)

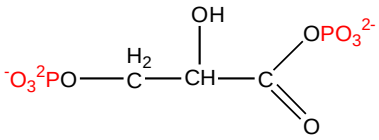


Glyceraldehyde-3-phosphate dehydrogenase (GAPDH)

P_i + NAD^+

NADH

1,3-Bisphosphoglycerate (2)



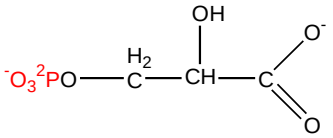
Phosphoglycerate kinase (PGK)

ADP

ATP

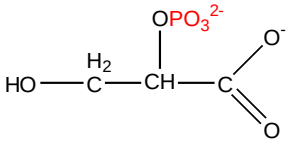
Mg^{2+}

3-Phosphoglycerate (2)



Phosphoglycerate mutase (PGM)

2-Phosphoglycerate (2)

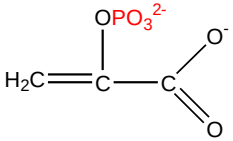


Enolase

Mg^{2+}

H_2O

Phosphoenolpyruvate (2)



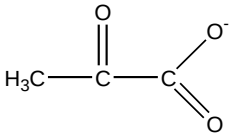
Pyruvate kinase (PK)

ADP

ATP

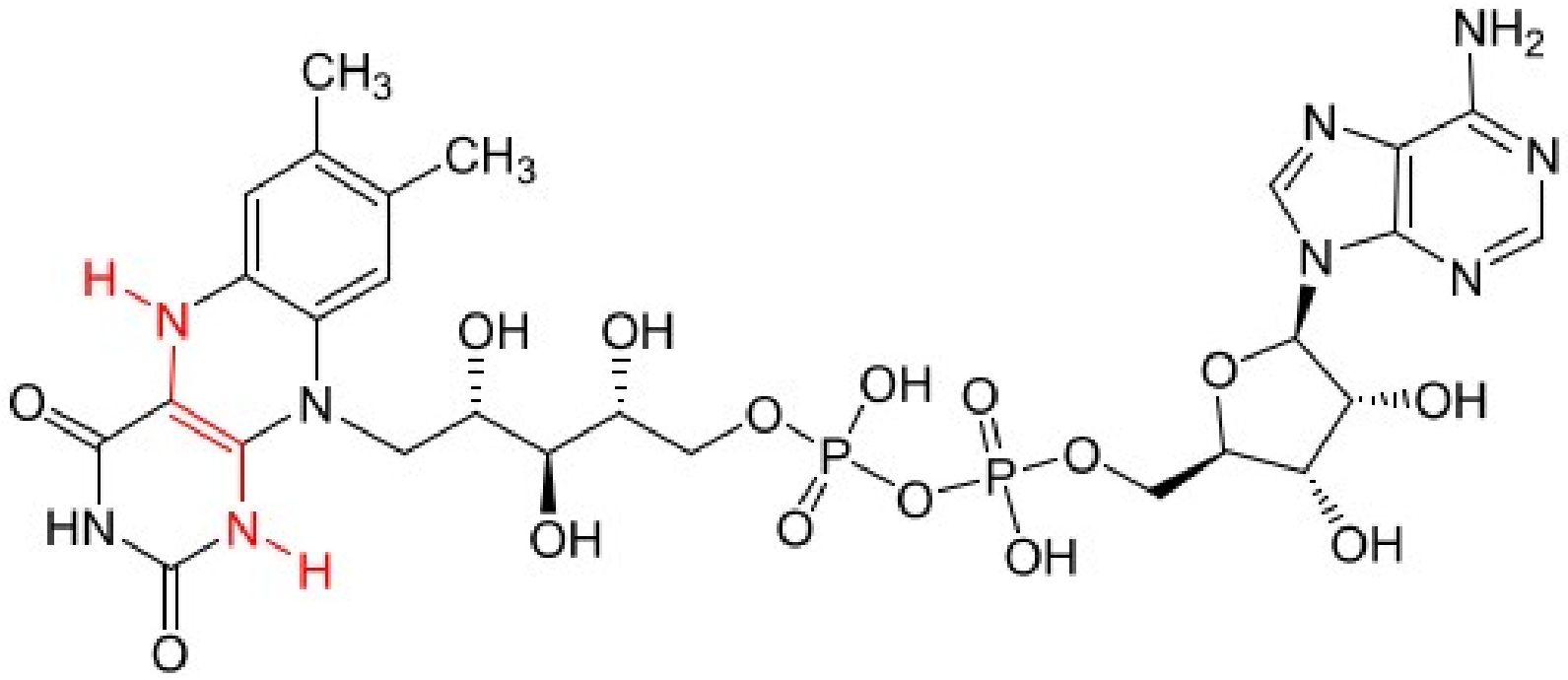
Mg^{2+}, K^+

Pyruvate (2)

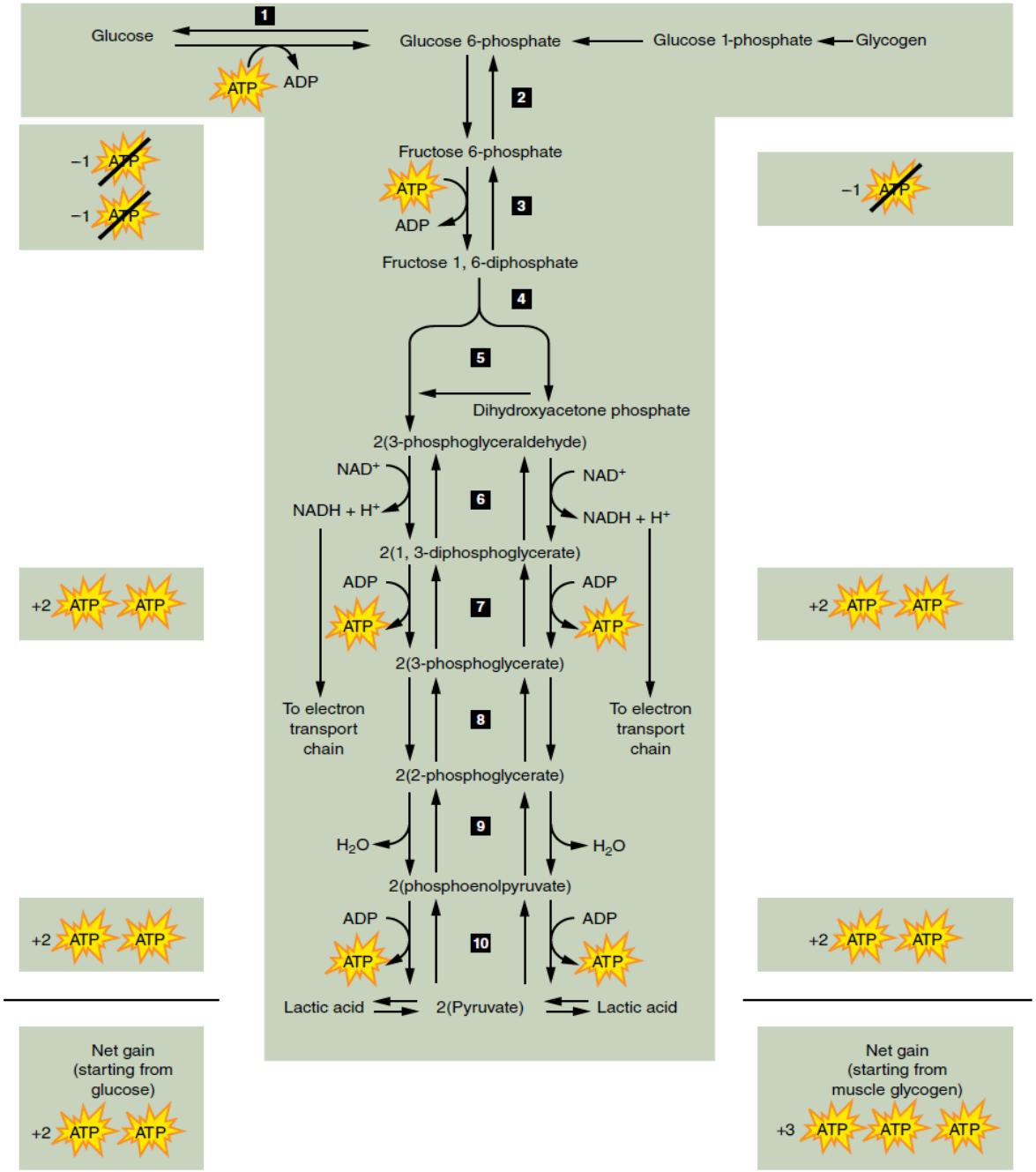


Designed by: Mohsen Ebrahimi (Assistant Professor Of Semnan University)

NADH **NAD⁺**



Flavin-Adenin-Dinucleotid ($FADH_2$)



برگرد

Designed by: Mohsen Ebrahimi (Assistant Professor Of Semnan University)

Glycolysis

TABLE 5-1

Control Enzymes of Glycolysis

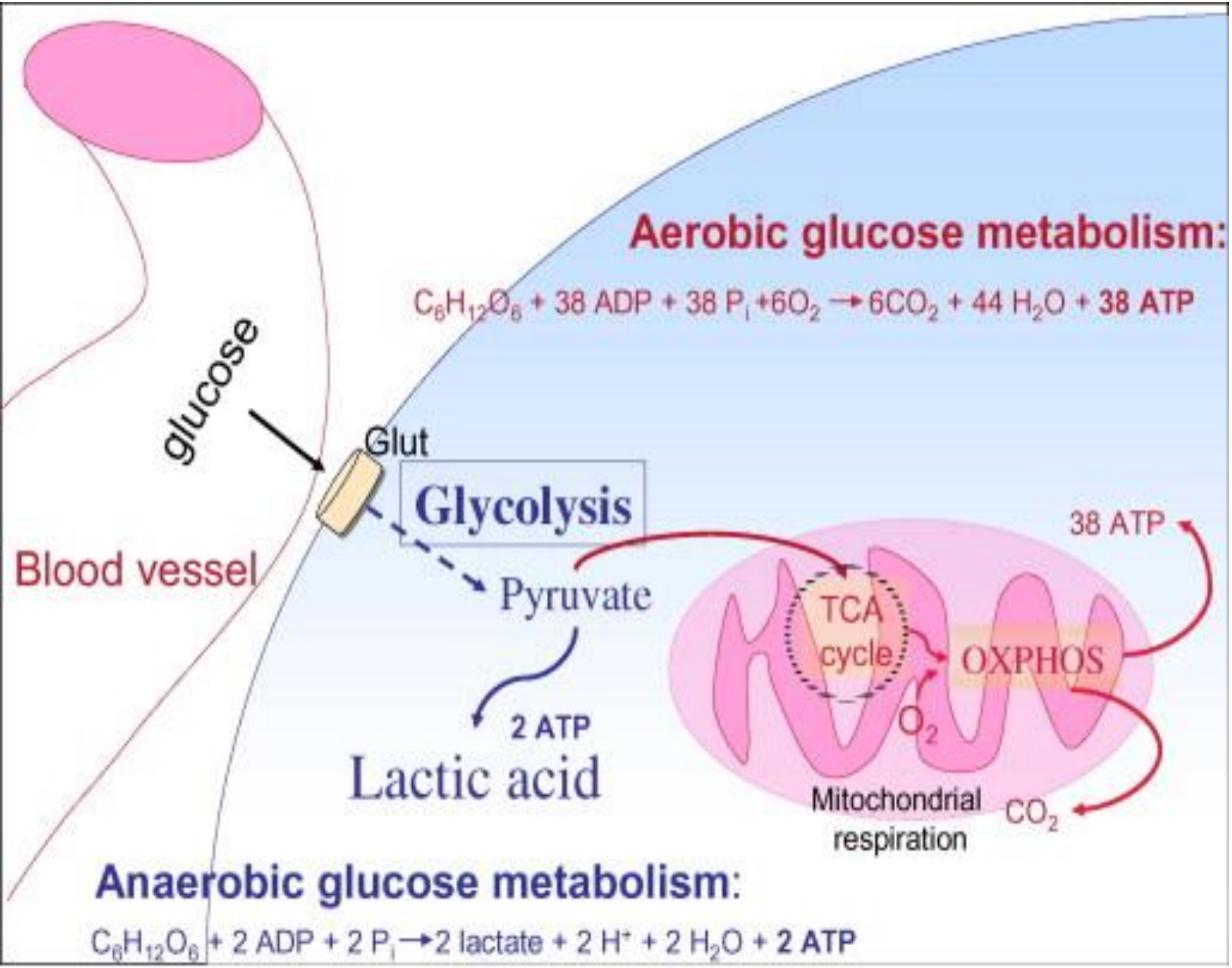
Enzyme	Stimulators	Inhibitors
Phosphofructokinase	ADP, P_i, ↑pH, (NH_4^+)	ATP, CP, citrate
Pyruvate kinase		ATP, CP
Hexokinase		Glucose 6-phosphate
Lactic dehydrogenase		ATP

Brooks et al.

افزایش سرعت گلیکولیز در اثر ورزش

- ✓ افزایش سوبسترا
  - ➢ افزایش گلیکوژنولیز
  - ➢ جذب گلوکز بیشتر از خون (افزایش جریان خون–افزایش GLUTها)
- ✓ افزایش فعالیت فسفوفروکتوکیناز
  - ➢ تنظیم آلوستری (با ATP و CP مهار و با آمونیاک و AMP افزایش می یابد)
- ✓ افزایش فعالیت پیروات کیناز
  - ➢ با ATP و CP مهار و با ADP افزایش می یابد

Designed by: Mohsen Ebrahimi (Assistant Professor Of Semnan University)


Aerobic glucose metabolism:
$C_6H_{12}O_6 + 38\ ADP + 38\ P_i + 6O_2 \rightarrow 6CO_2 + 44\ H_2O + 38\ ATP$
glucose
Glut
Glycolysis
Blood vessel
Pyruvate
38 ATP
TCA cycle
OXPHOS
O_2
2 ATP
Lactic acid
Mitochondrial respiration
CO_2
Anaerobic glucose metabolism:
$C_6H_{12}O_6 + 2\ ADP + 2\ P_i \rightarrow 2\ lactate + 2\ H^+ + 2\ H_2O + 2\ ATP$

سرنوشت پیروات

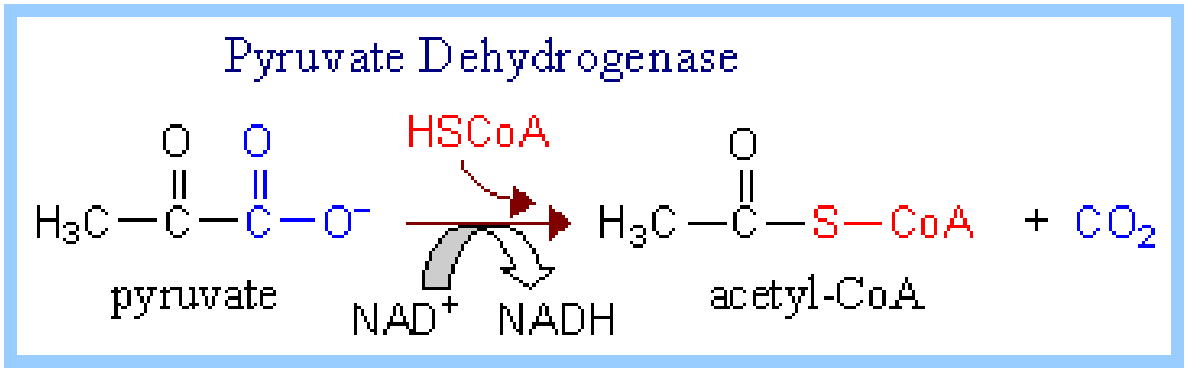
- در صورت کمبود اکسیژن که در فعالیت شدید اتفاق می افتد، توسط آنزیم لاکتات دهیدروژناز به اسید لاکتیک و بعد از آن به لاکتات تبدیل می شود.

- در صورت کافی بودن اکسیژن که در فعالیت هوازی اتفاق می افتد، توسط آنزیم پیروات دهیدروژناز به استیل کو آ تبدیل می شود.

Designed by: Mohsen Ebrahimi (Assistant Professor Of Semnan University)

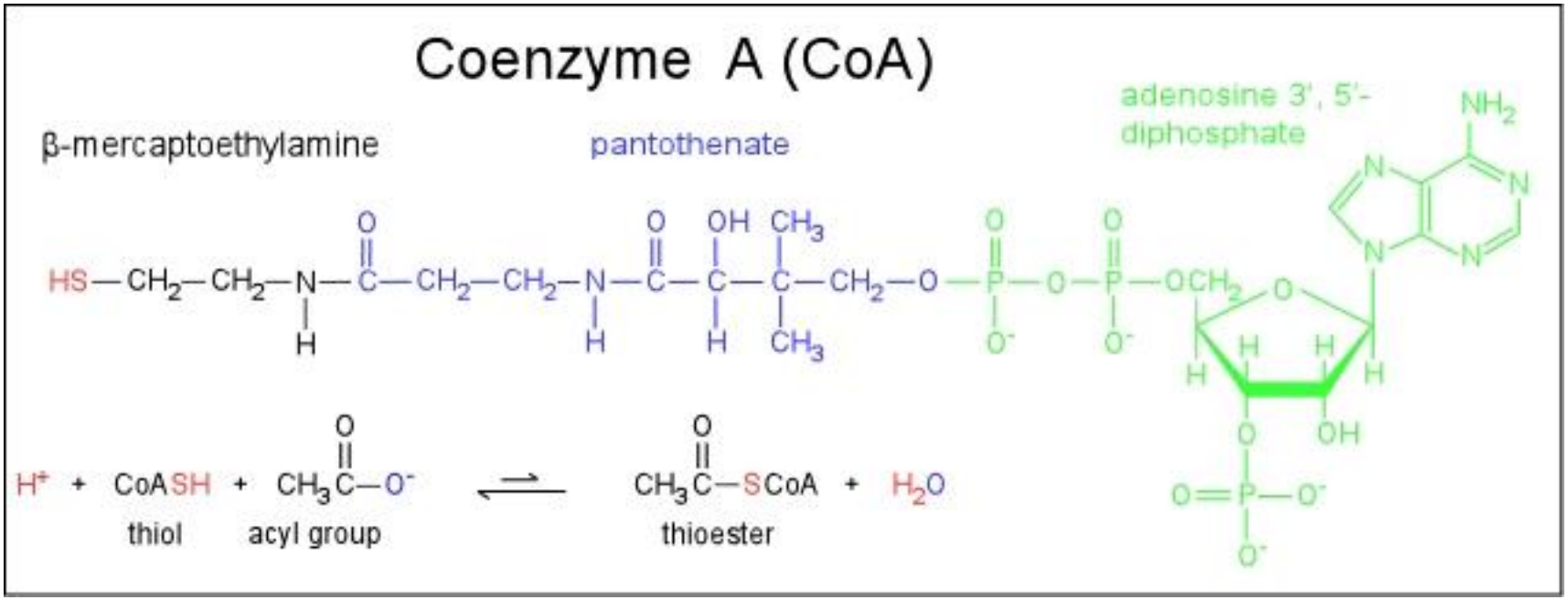
اکسایش پیروات

- ✓ در داخل میتوکندری
- ✓ با کوآنزیم A واکنش می دهد ⟵ استیل کوآ
- ✓ کوآ توانایی حمل گروه های اسیل و استیل را دارد
- ✓ برگشت ناپذیر



برگرد

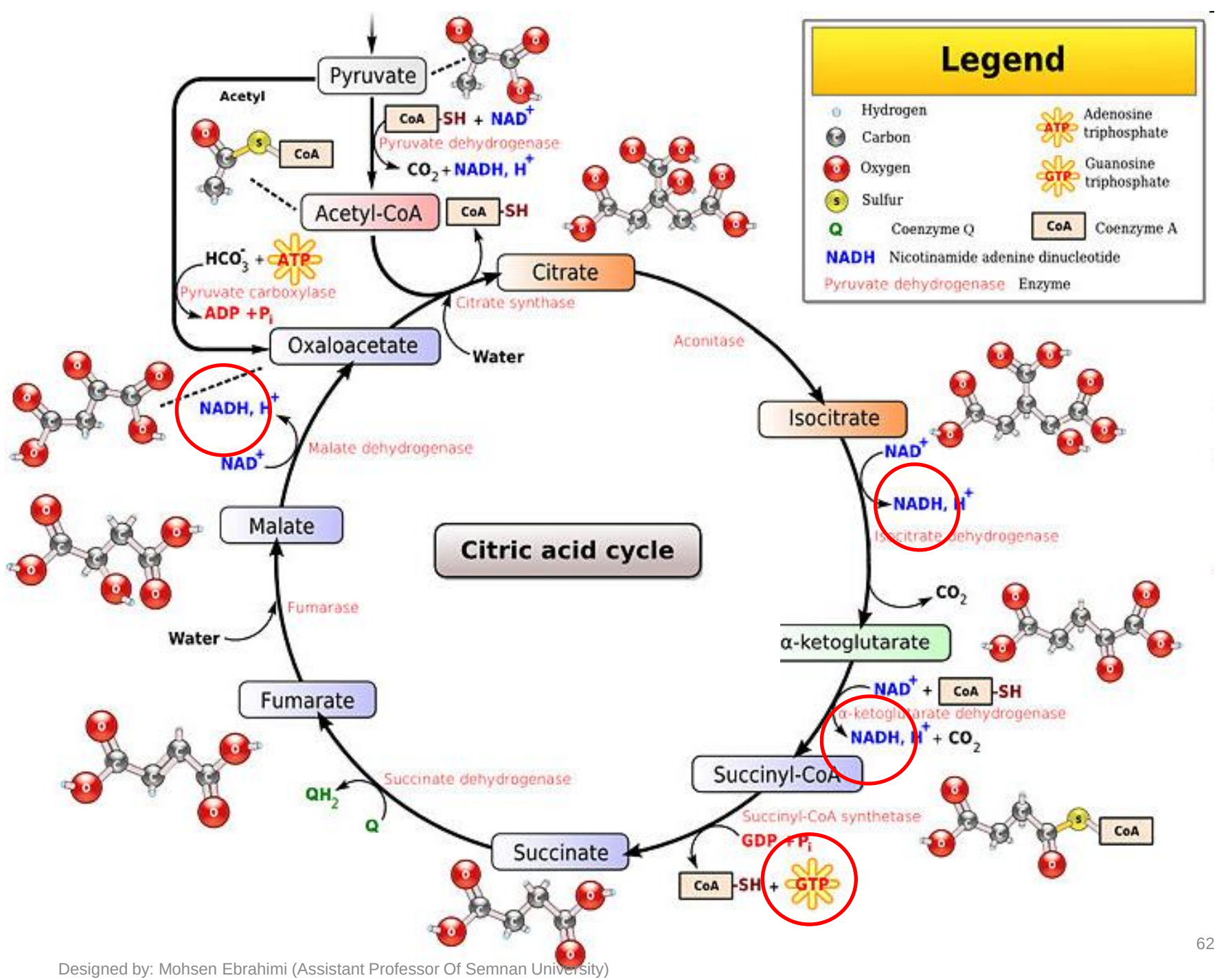
$C_{21}H_{36}N_7O_{16}P_3S$



چرخه کربس

- هانس کربس در سال ۱۹۳۷
- شامل ۹ واکنش آنزیمی است
- چرخه تری‌کربوکسیلیک اسید (TCA)
- چرخه اسید سیتریک

Designed by: Mohsen Ebrahimi (Assistant Professor Of Semnan University)



Designed by: Mohsen Ebrahimi (Assistant Professor Of Semnan University)

مقدار ATP تولیدی

- به ازای هر گلوکز ۲ بار می چرخد
- محصول یک دور چرخه
  - ۲ مولکول CO_2
  - ۳ تا NADH
  - $FADH_2$
  - GTP

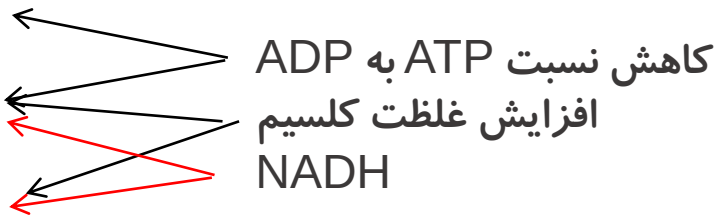
Designed by: Mohsen Ebrahimi (Assistant Professor Of Semnan University)

ATP yield during aerobic respiration of one molecule of glucose

Respiratory process	No.of reduced H carrier molecules formed	No.of ATP molecules formed from reduced H carriers	No. of ATP molecules	Total No. of ATP molecules
Glycolysis	$2NADH_2^+$	2 x 3 = 6	2	8
Pyruvate → acetyl CoA	$2NADH_2^+$	2 x 3 = 6	0	6
Krebs Cycle	3 $NADH_2^+$ x 2 1 $FADH_2^+$ x 2	6 x 3 = 18 2 x 2 = 4	1 x 2	24
			Total ATP	38

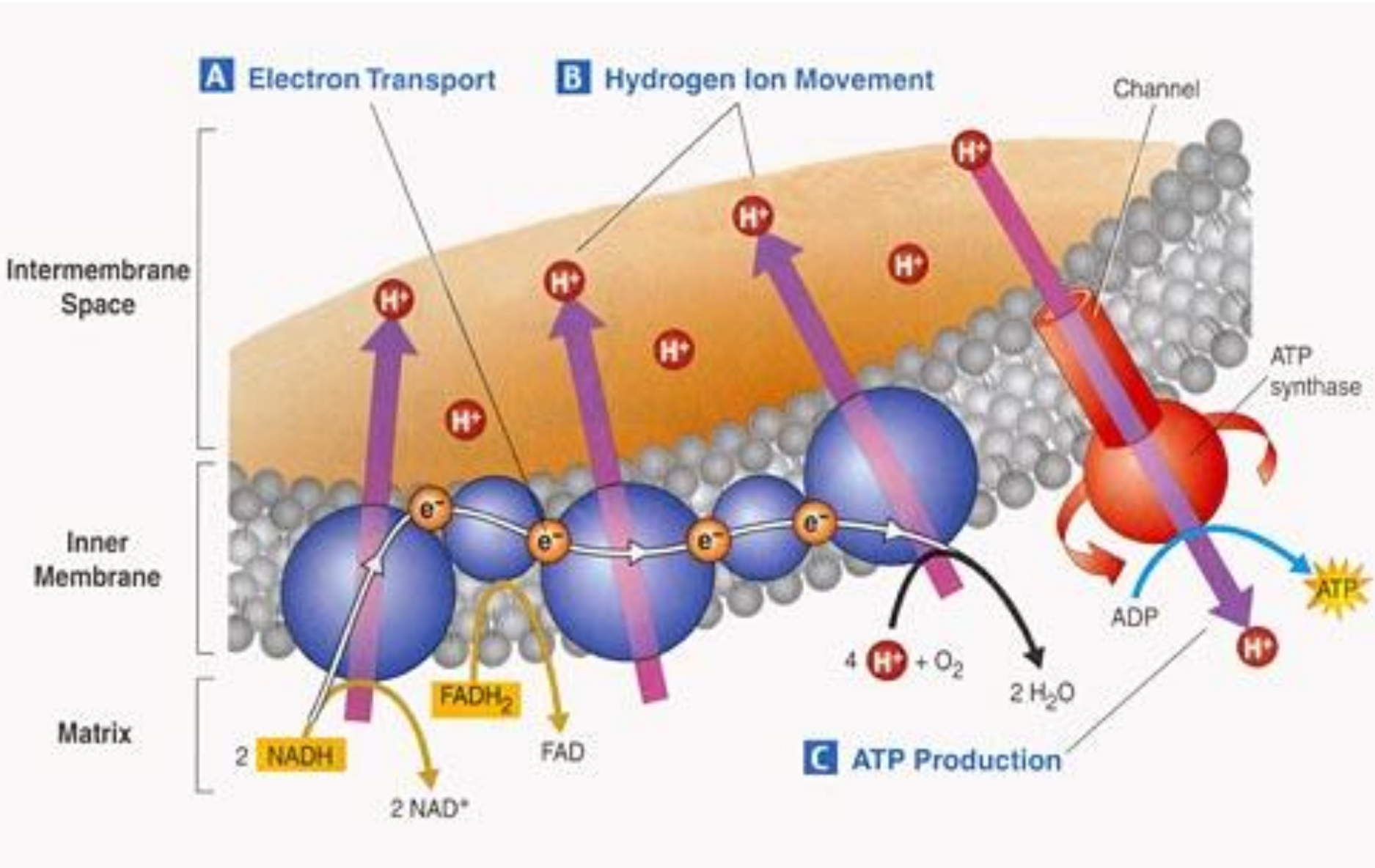
تاثیر ورزش بر چرخه کربس

- افزایش ۱۰۰ برابری (بدلیل افزایش غلظت استیل CoA)
- تنظیم آلوستری سه آنزیم:
  - سیترات سنتاز (واکنش ۱)
  - ایزوسیترات دهیدروژناز (واکنش ۳)
  - آلفاکتوگلوتارات دهیدروژناز (واکنش ۴)

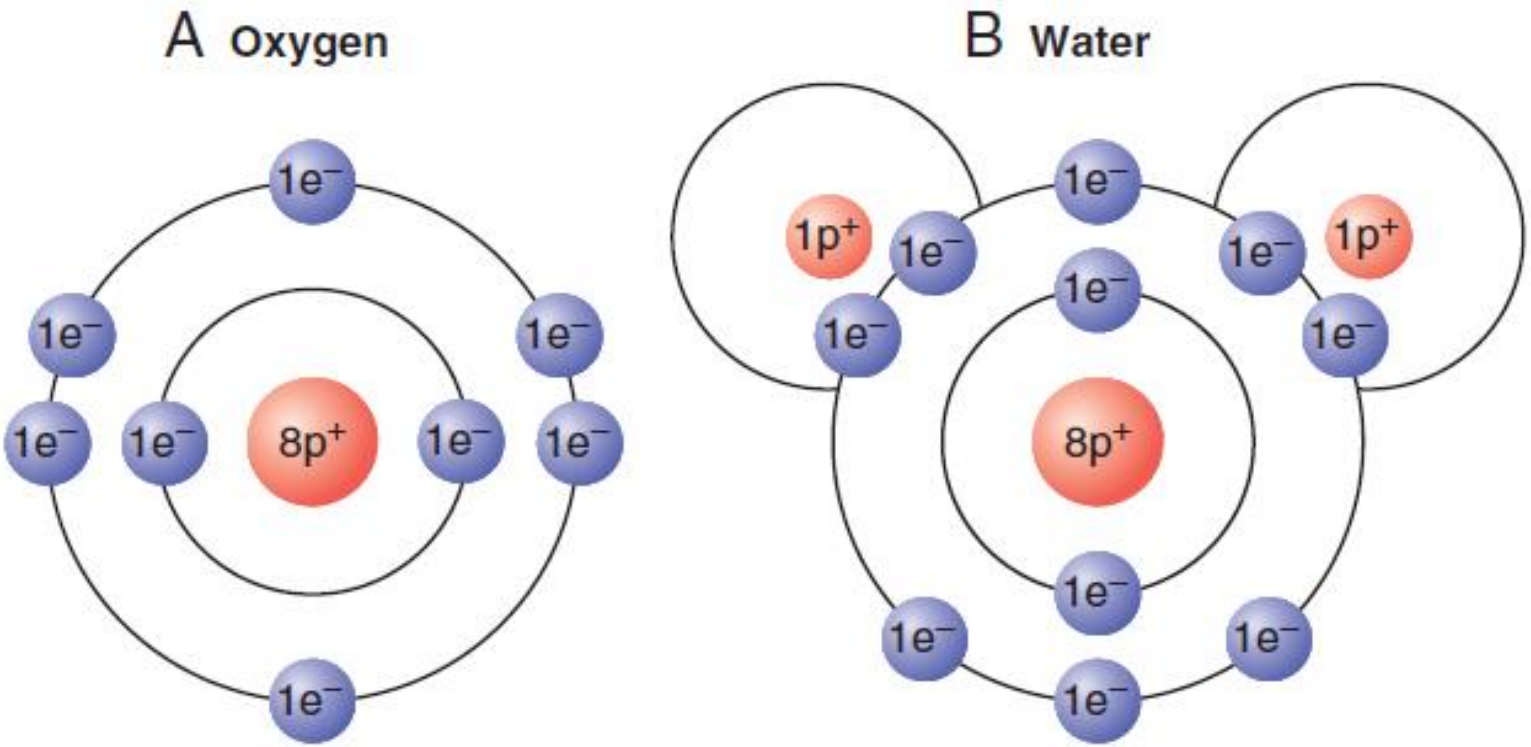


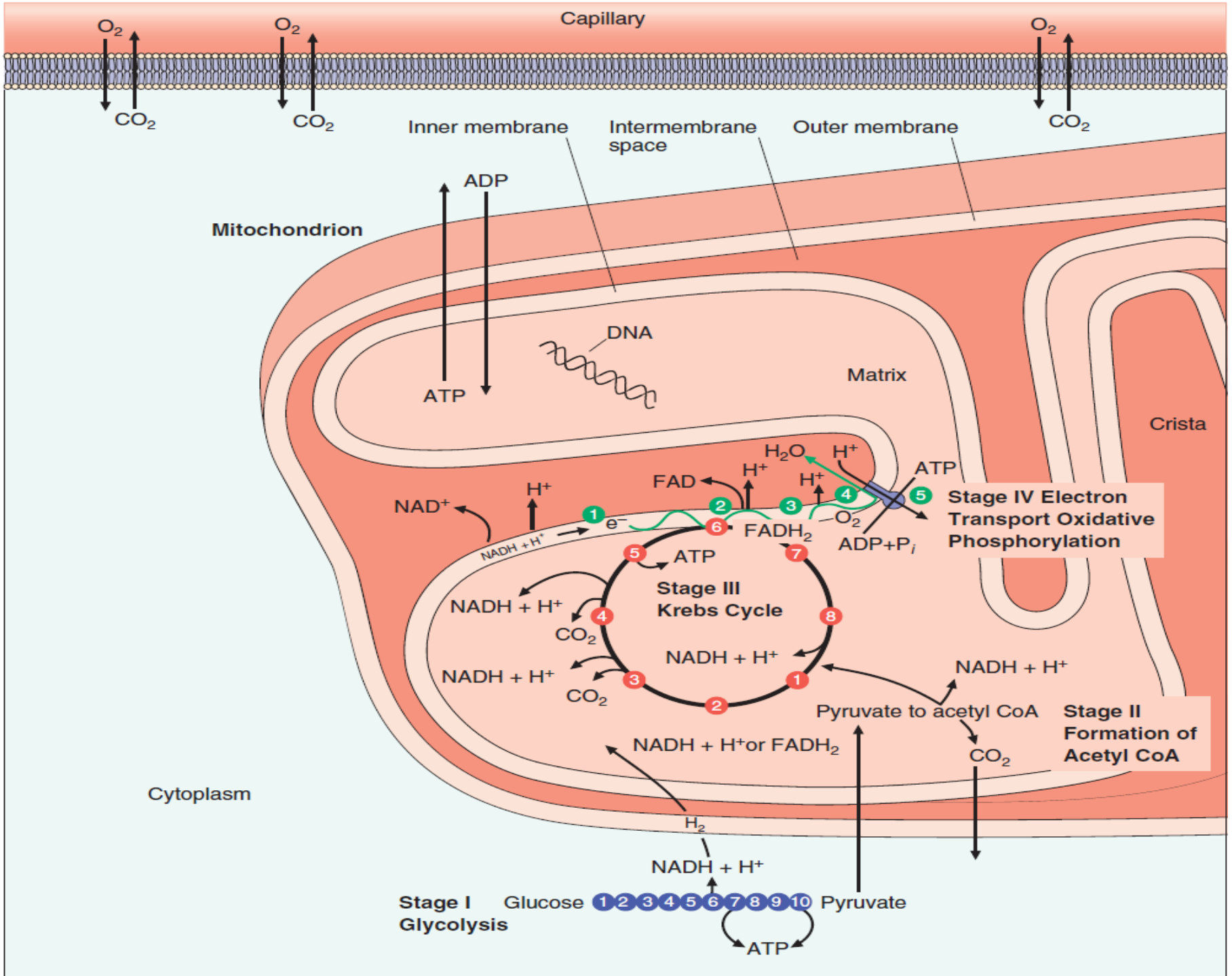
برو

زنجیره انتقال الکترونی

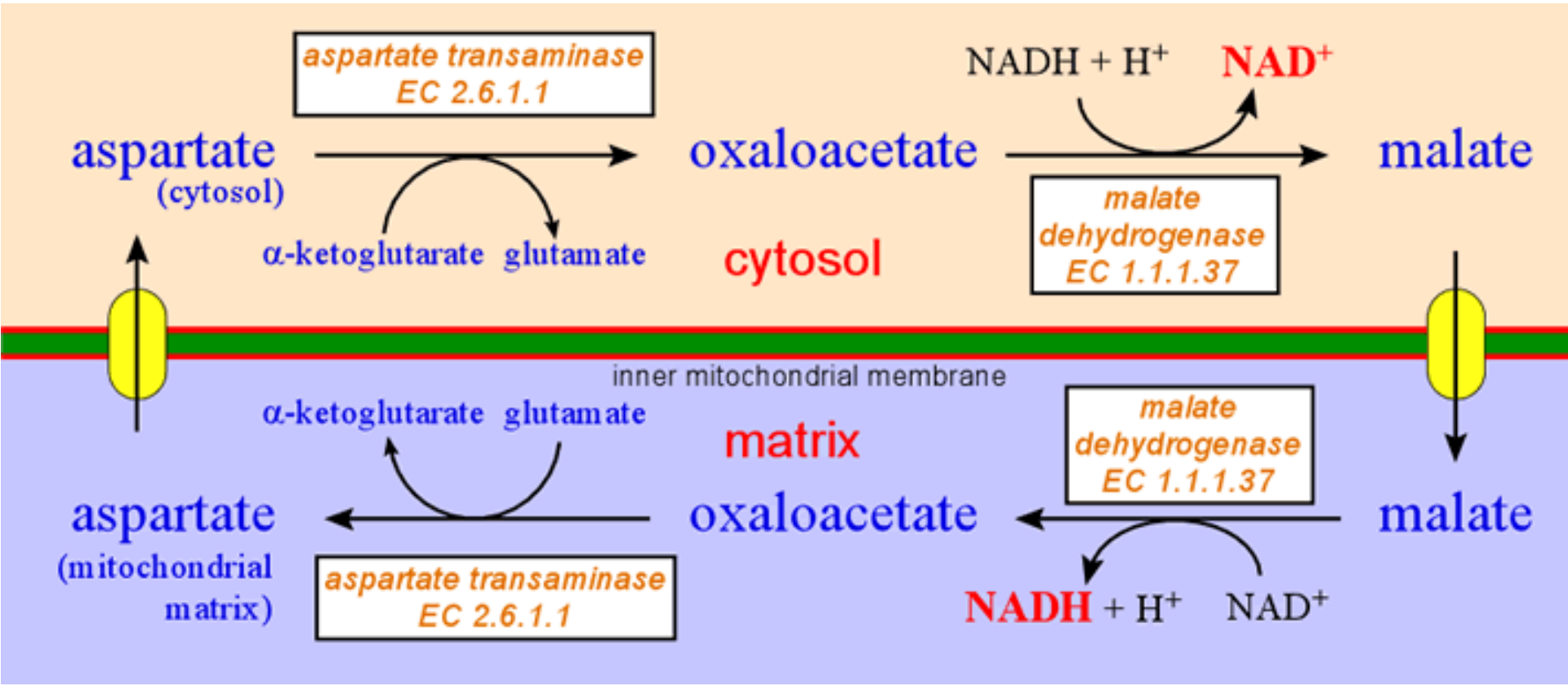


Designed by: Mohsen Ebrahimi (Assistant Professor Of Semnan University)


A Oxygen
B Water
1e⁻
8p⁺
1p⁺
O + 2e⁻ ⟶ O⁼ + 2H⁺ ⟶ H₂O

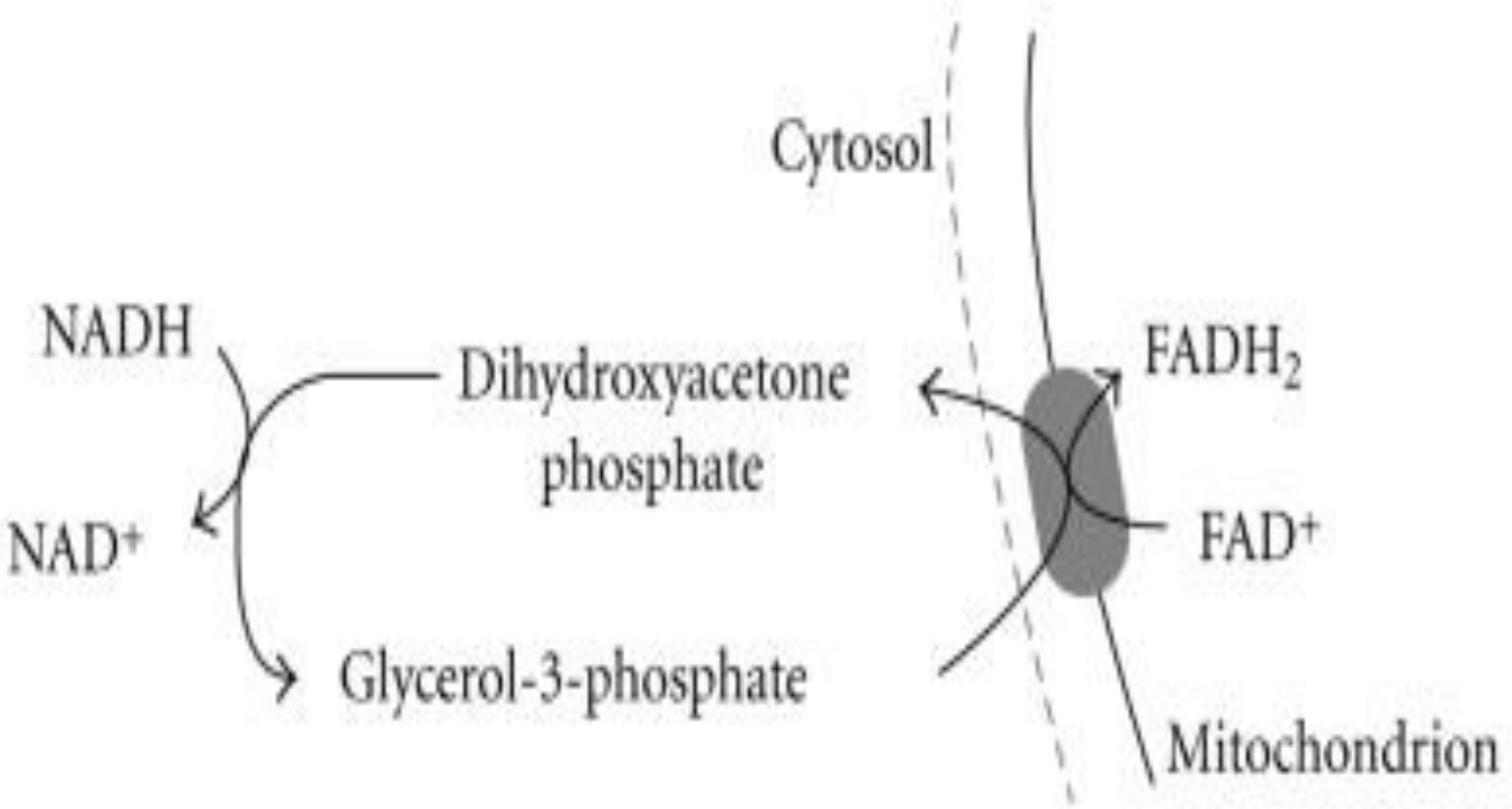

Capillary
O_2
CO_2
Inner membrane
Intermembrane space
Outer membrane
ADP
ATP
Mitochondrion
DNA
Matrix
Crista
H_2O
H^+
FAD
$FADH_2$
O_2
ATP
$ADP+P_i$
Stage IV Electron Transport Oxidative Phosphorylation
NAD^+
$NADH + H^+$
e^-
Stage III Krebs Cycle
CO_2
Pyruvate to acetyl CoA
Stage II Formation of Acetyl CoA
$NADH + H^+$ or $FADH_2$
Cytoplasm
H_2
Stage I Glycolysis
Glucose
Pyruvate

شاتل مالات آسپارتات (عمدتا در قلب)



Designed by: Mohsen Ebrahimi (Assistant Professor Of Semnan University)

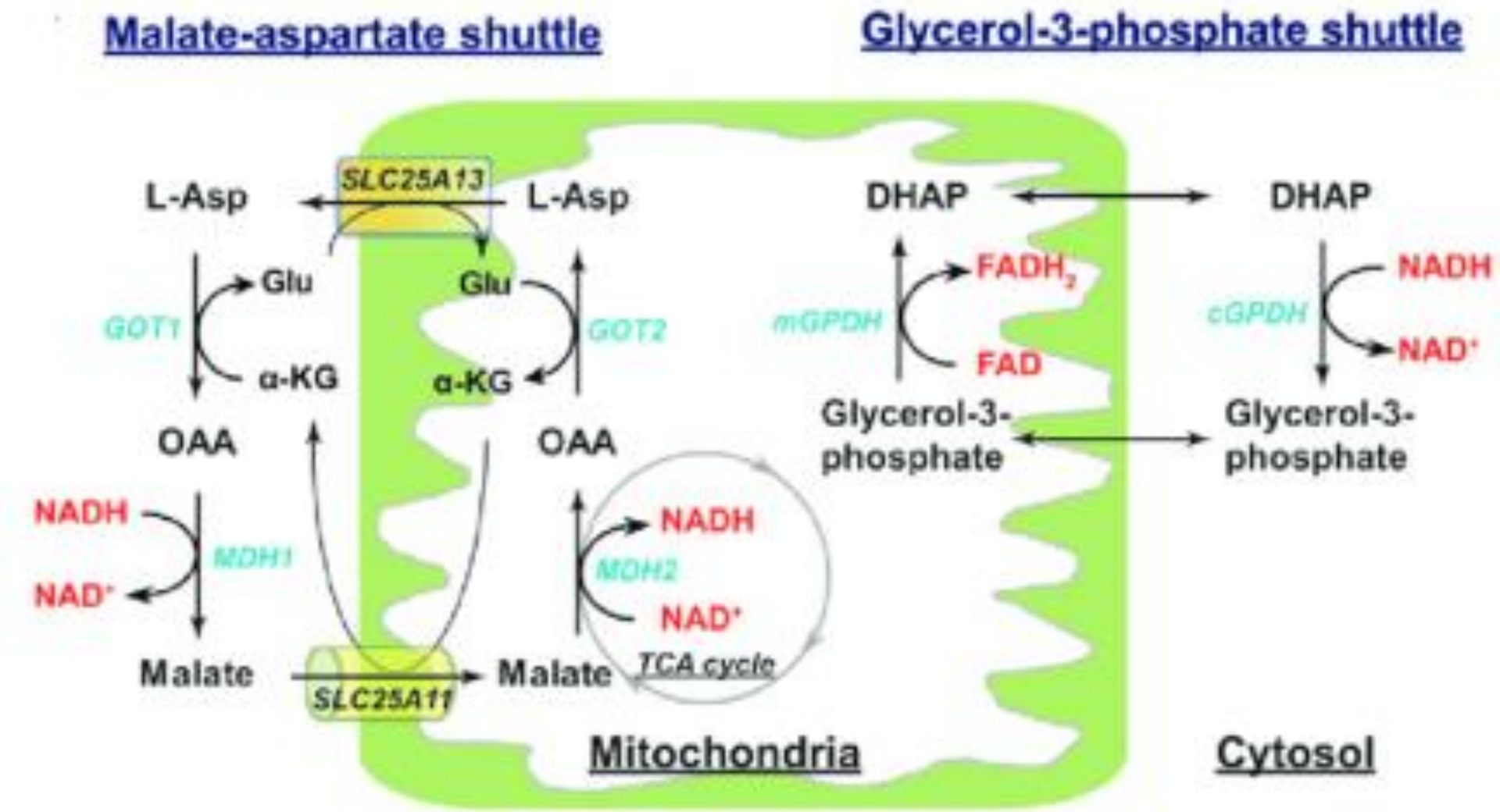
شاتل گلیسرول فسفات (در عضله)



Designed by: Mohsen Ebrahimi (Assistant Professor Of Semnan University)

Shuttle Pathways or Systems

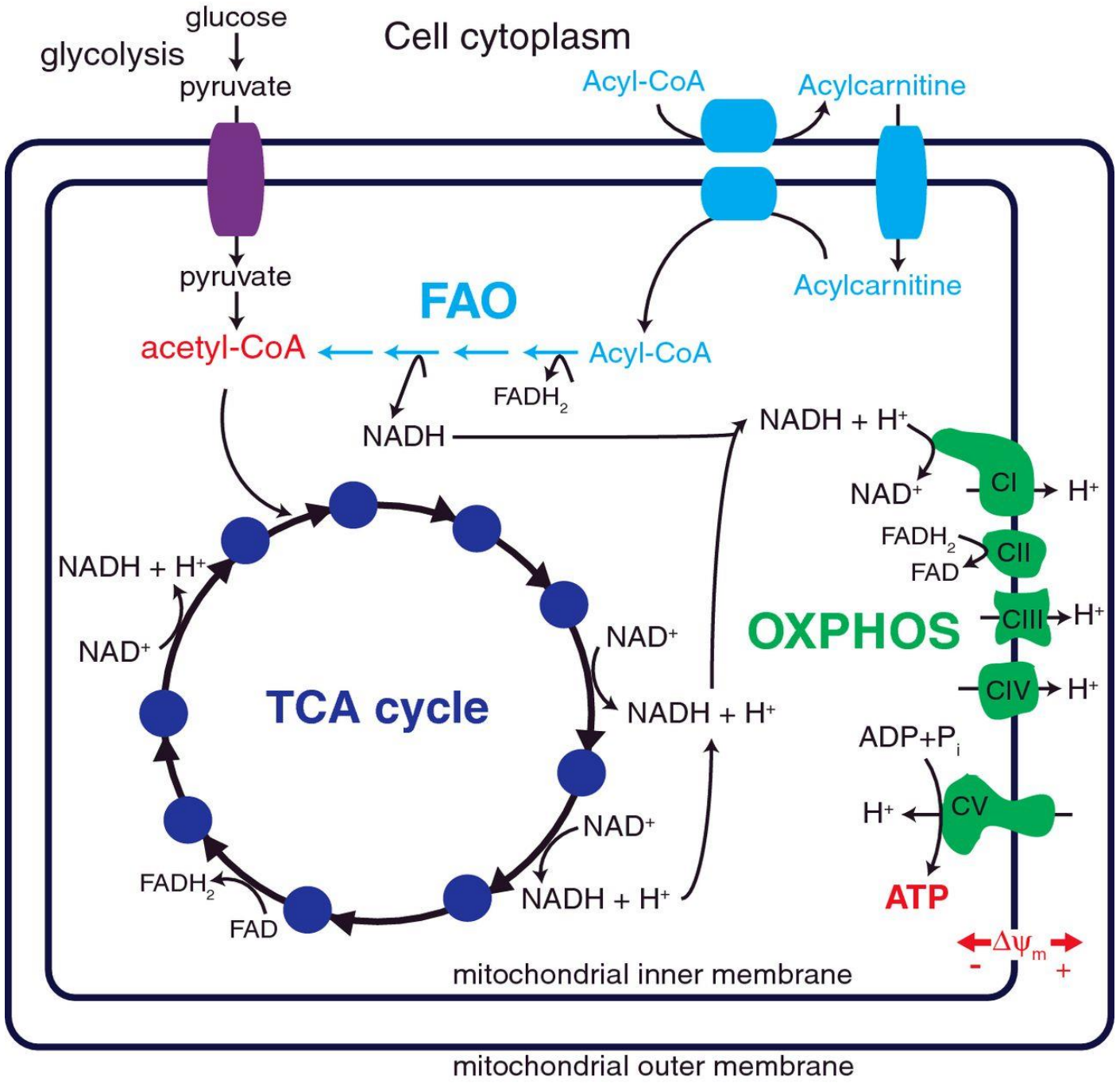
(Transport of reducing equivalents)



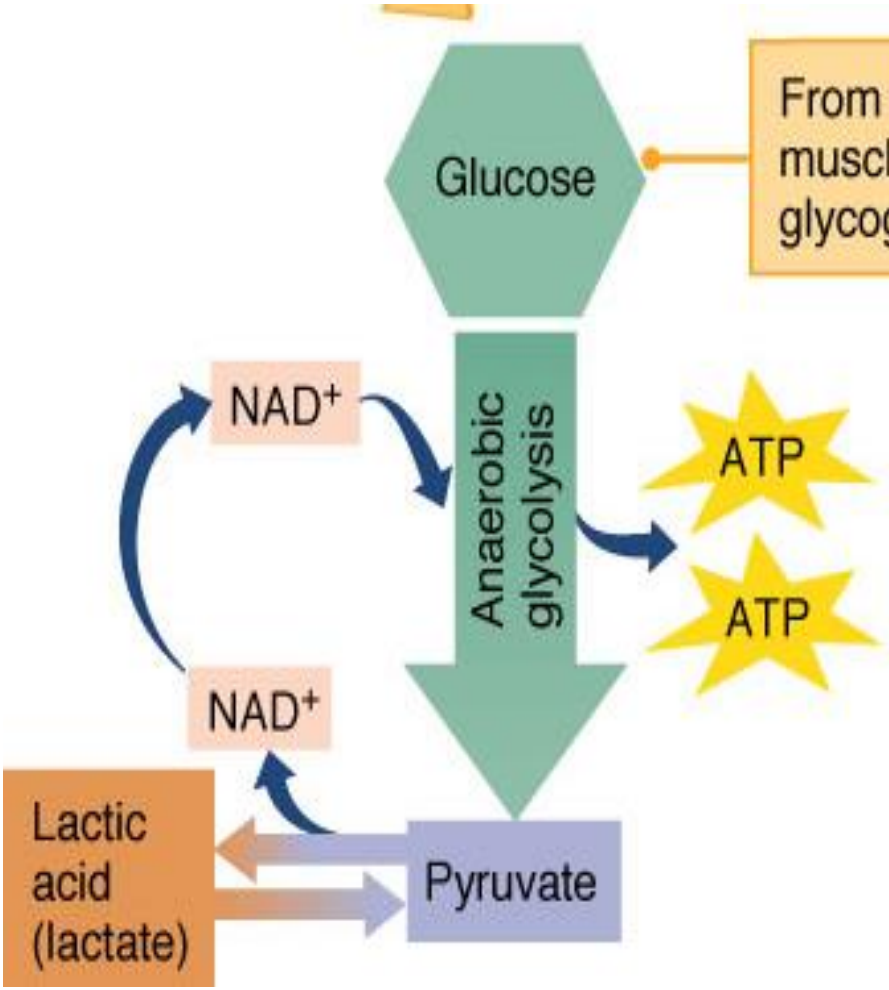
تفاوت متابولیکی عضله قلبی و اسکلتی

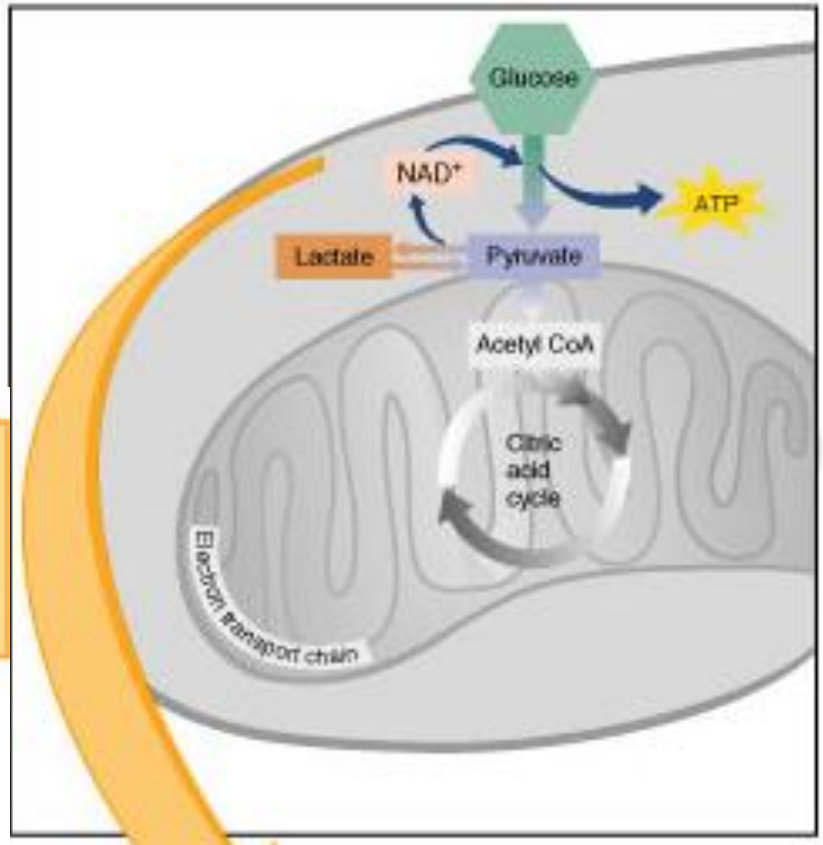
- به دلیل تفاوت در سیستم شاتل، مقدار انرژی که در عضله قلب تولید می شود بیشتر از عضله اسکلتی است.
- در عضله قلبی، شاتل H^+ را به $NADH^+$ تحویل می دهد در حالی که در عضله اسکلتی شاتل H^+ را به FAD تحویل می دهد.
- مقدار ATP تولید شده در ETS/OP بستگی به جایی دارد که حامل ها وارد چرخه می شوند. به طوریکه $NADH + H^+$ مقدار بیشتری ATP نسبت به $FADH_2$ تولید می کند.
- در بقیه مراحل، تفاوتی در مقدار تولید ATP بین عضله اسکلتی و قلبی وجود ندارد.

Designed by: Mohsen Ebrahimi (Assistant Professor Of Semnan University)


glucose
glycolysis
pyruvate
Cell cytoplasm
Acyl-CoA
Acylcarnitine
pyruvate
Acylcarnitine
FAO
acetyl-CoA
Acyl-CoA
FADH2
NADH
NADH + H+
NAD+
CI
H+
FADH2
FAD
CII
NADH + H+
NAD+
TCA cycle
OXPHOS
CIII
H+
NAD+
NADH + H+
CIV
H+
ADP+Pi
H+
CV
NAD+
FADH2
NADH + H+
ATP
FAD
Δψmitochondrial inner membrane
-
+
mitochondrial outer membrane

زمانی که فعالیت شدید باشد

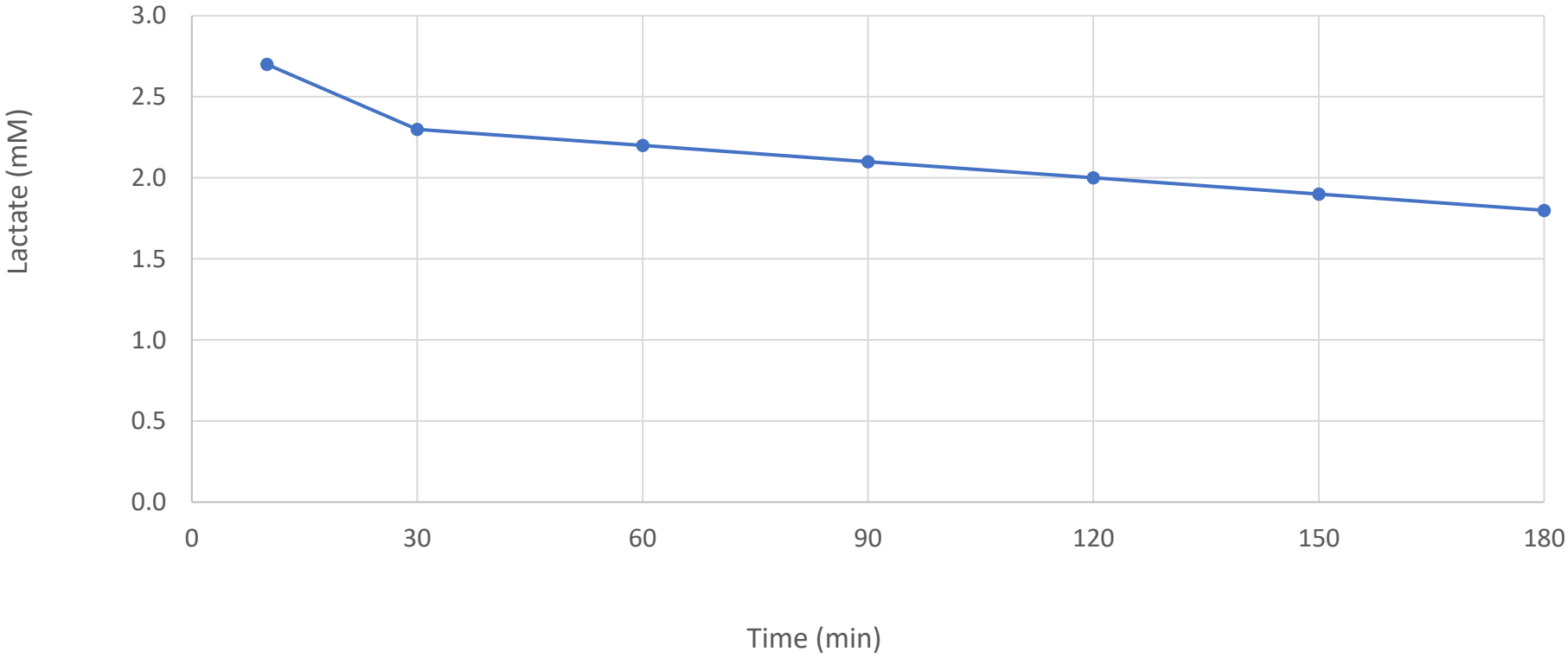




ورود به آب میان بافتی و خون

Designed by: Mohsen Ebrahimi (Assistant Professor Of Semnan University)

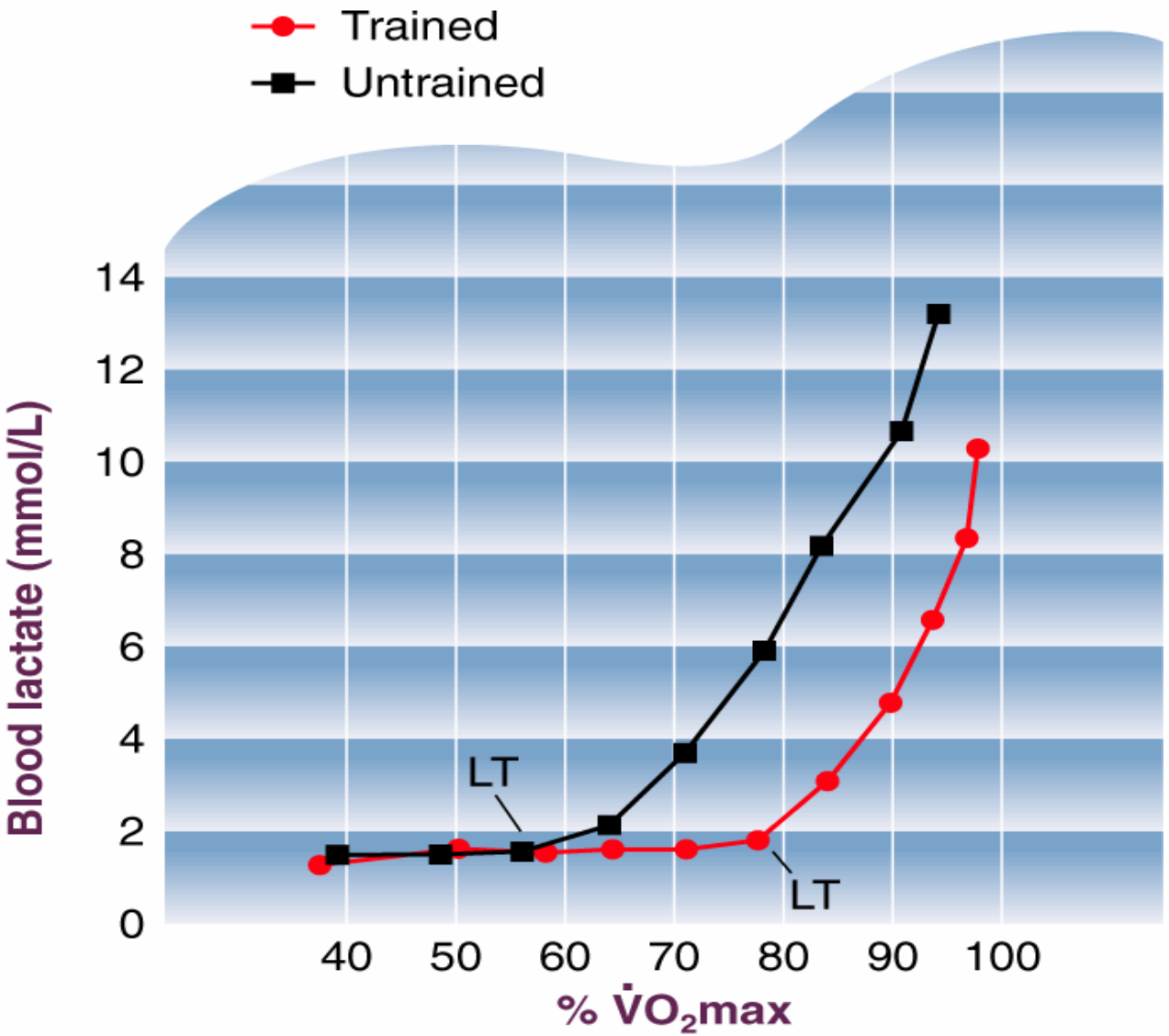
Lactate Response to Prolonged Exercise (70% of VO_{2max})



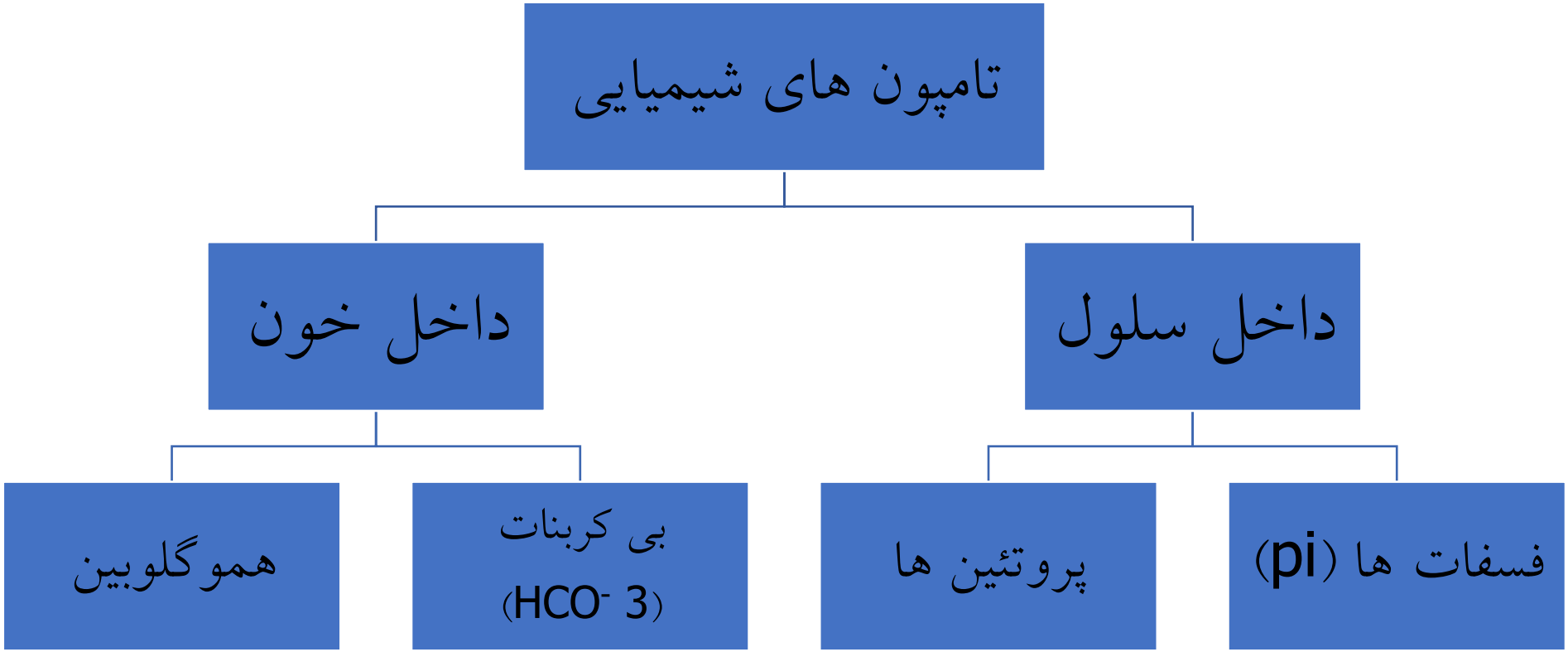
(Kolkhorst & Buono, *Virtual Exercise Physiology Lab*, 2004)

Designed by: Mohsen Ebrahimi (Assistant Professor Of Semnan University)

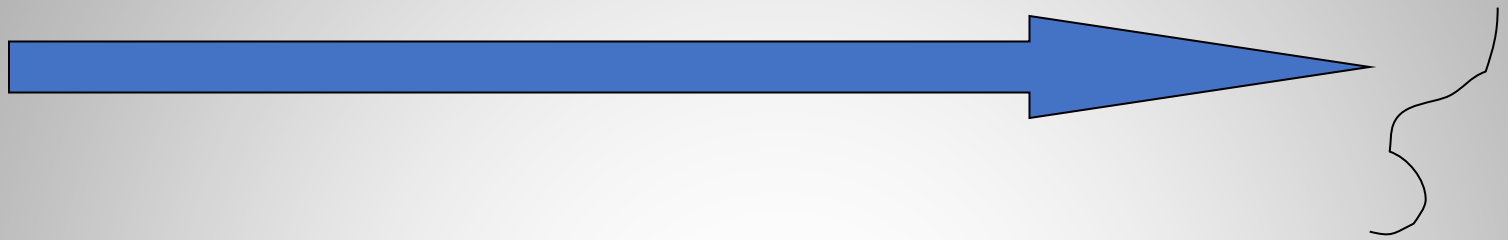
Training status and LT



اسید لاکتیک
لاکتات
H^+


تامپون های شیمیایی
داخل سلول
داخل خون
فسفات ها (pi)
پروتئین ها
بی کربنات
(HCO^-_3)
هموگلوبین

افزایش تنفس



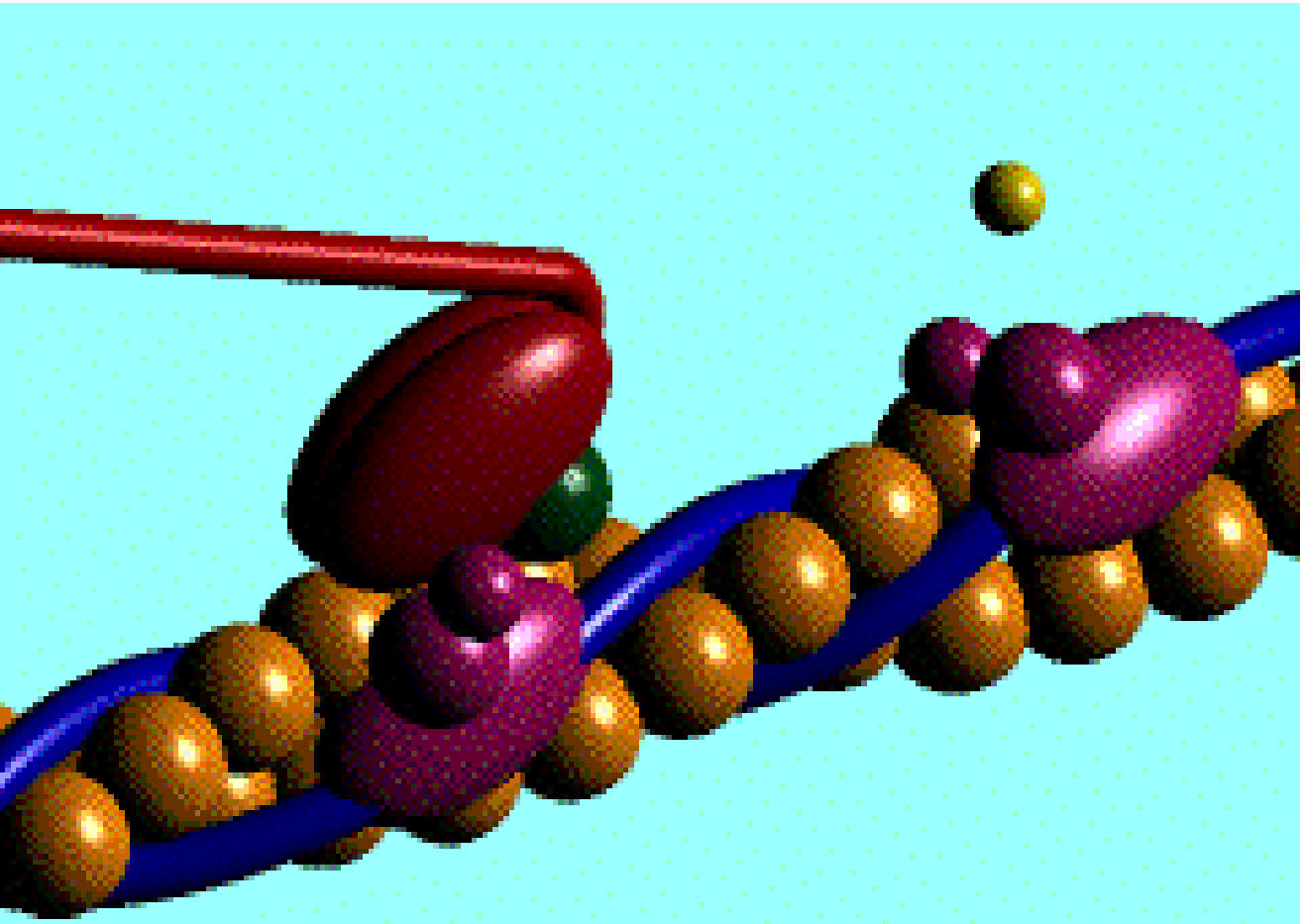
$HCO_3^- + H^+ \leftrightarrow H_2CO_3 \leftrightarrow H_2O + CO_2$

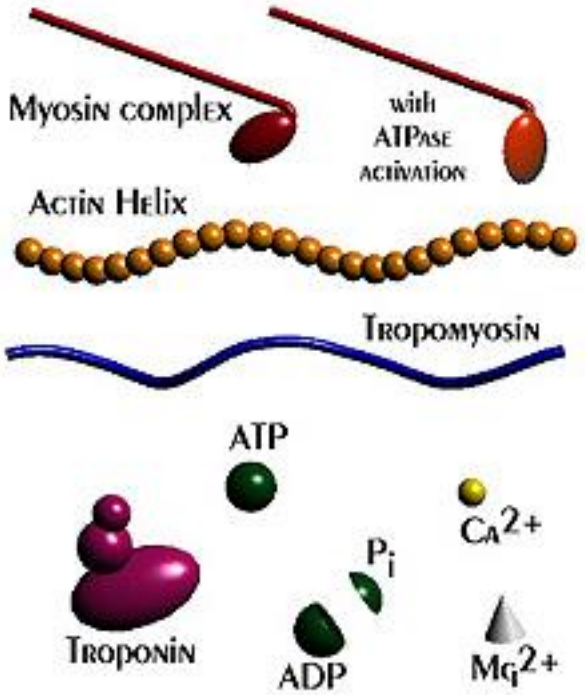
Designed by: Mohsen Ebrahimi (Assistant Professor Of Semnan University)

(Fitts, 2003) suggests that an elevated muscle [H+] could depress muscle function by

1. **reducing the transition of the cross-bridge from the low- to the high-force state,**
2. **inhibiting maximal shortening velocity**
3. **inhibiting myofibrillar ATPase**
4. **inhibiting glycolytic rate**

5. reducing cross bridge activation by competitively inhibiting Ca2+ binding to troponin C
6. reducing Ca2+ re-uptake by inhibiting the sarcoplasmic ATPase.





Designed by: Mohsen Ebrahimi (Assistant Professor Of Semnan University)

Metabolic Fate of Lactate

- During exercise:
  - ~¾ oxidized by heart, liver, and ST fibers
- During recovery:
  - oxidized by heart, ST fibers, and liver
  - converted to glycogen
  - incorporated into amino acids

❖La metabolism depends on metabolic state

During recovery:

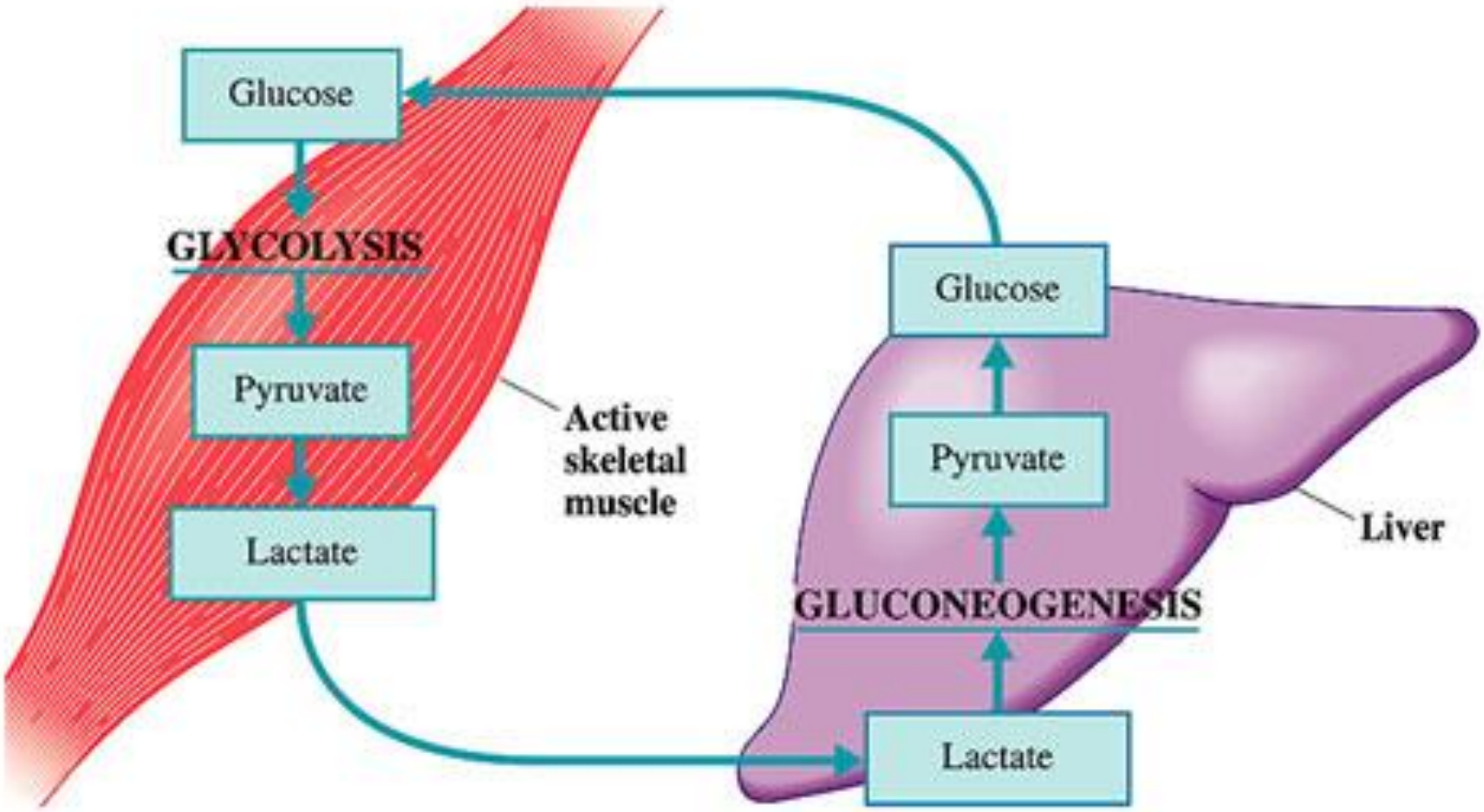
65% of lactic acid is converted to carbon and water,

20% into glycogen,

10% into protein and

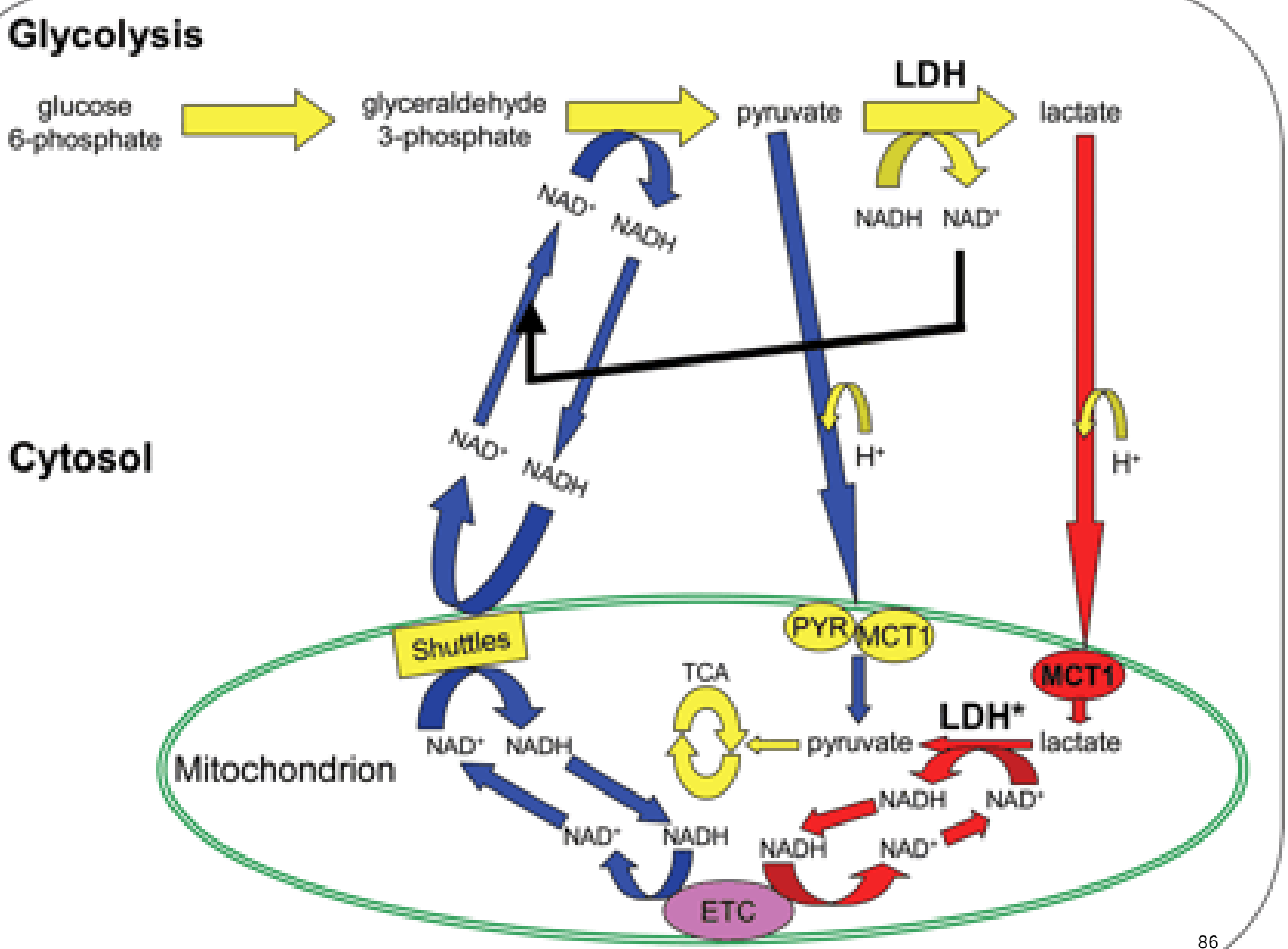
5% into glucose .

چرخه کوری

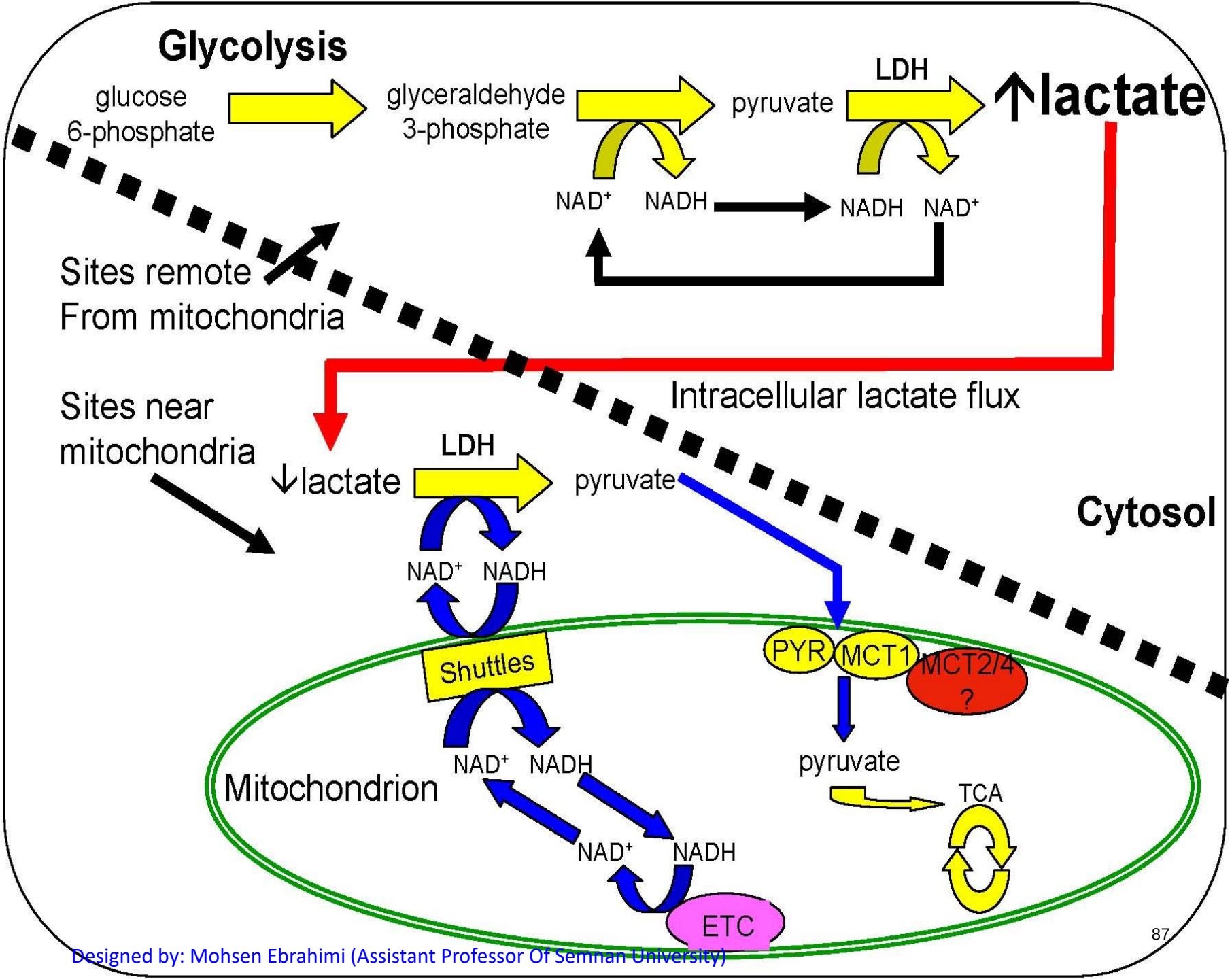


Designed by: Mohsen Ebrahimi (Assistant Professor Of Semnan University)

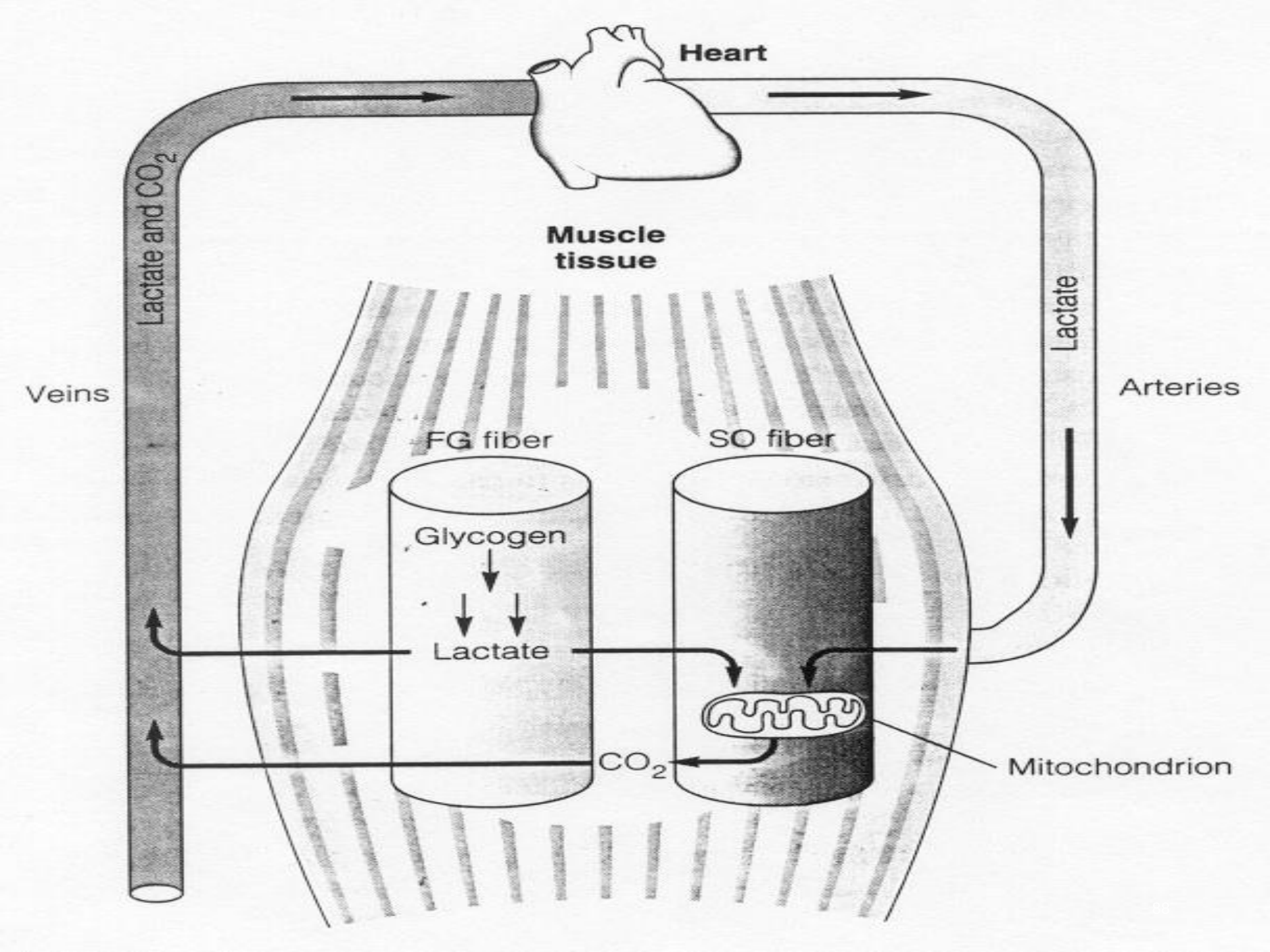
Intracellular lactate shuttle



Designed by: Mohsen Ebrahimi (Assistant Professor Of Semnan University)



Designed by: Mohsen Ebrahimi (Assistant Professor Of Semnan University)


Heart
Muscle tissue
Lactate and CO_2
Veins
Lactate
Arteries
FG fiber
SO fiber
Glycogen
Lactate
CO_2
Mitochondrion

نوع آنزیم لاکتات دهیدروژناز(LDH)

در تارهای تند انقباض LDH تمایل به تبدیل پیروات به اسید لاکتیک دارد اما در تارهای کند انقباض برعکس اتفاق می افتد.

Monocarboxylate transporters

- facilitated diffusion transport of lactate and pyruvate in and out of cells
  - located on plasma and mitochondrial membrane
  - reversible transporter
  - involves H^+ transport
- MCT1 and MCT4 are major MCT isoforms
  - MCT1 found more in oxidative fibers
  - MCT4 found more in glycolytic fibers
  - at least 8 isoforms of MCTs known in humans

❖exercise training ↑ MCT1, but not MCT4

لاکتات و قلب

- تحقیقات نشان می دهد که در هنگام فعالیت شدید، لاکتات بیش از ٦٠ درصد از سوبسترای مصرفی قلب را تشکیل می دهد.

- تحقیقات دیگر نشان داد که تقریبا همه این مقدار لاکتات اکسید می شود.

لاکتات و مغز

- همچنین مشخص شده است که مغز نیز بویژه در هنگام فعالیت شدید از خون لاکتات برداشت می کند و این برداشت تا ۳۰ دقیقه پس از اتمام فعالیت (دوره ریکاوری) نیز ادامه دارد.

- MCT1 و MCT2 در سلول های اندوتلیال مغز یافت شده اند.

لاکتات و گلبول های قرمز

- در طول فعالیت شدید، لاکتات و H+ به داخل گلبول های قرمز خون انتقال داده می شود تا شیب غلظت بین پلاسما و عضله حفظ شود.
- مسیر غالب برای این انتقال به داخل گولبولهای قرمز MCT1 می باشد.
- در اغلب شرایط، ۷۰ درصد از محتوای لاکتات خون در پلاسما و ۳۰ درصد آن در گلبول های قرمز وجود دارد.

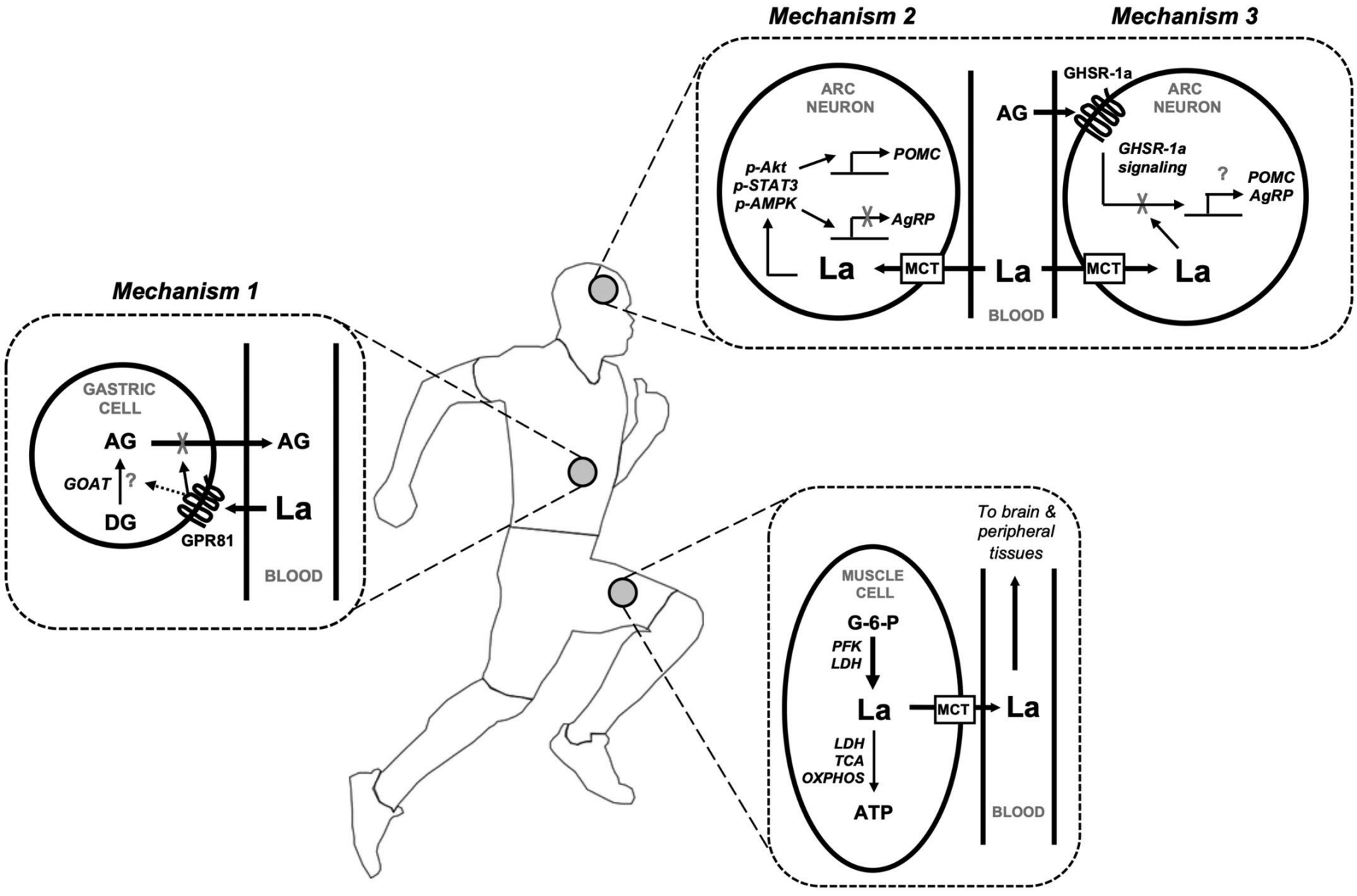
Lactate in injury, sepsis, and haemorrhage

- Lactate is an important intermediate in the process of wound repair and regeneration, a role that may not be generally familiar to researchers in the area of energy metabolism.

- As early as 1964, Green & Goldberg (1964) reported that collagen synthesis is increased almost twofold when [La–] rises to 15 mM in cultured fibroblasts.

لاکتات و اشتها

- McCarthy SF, Islam H, Hazell TJ. The emerging role of lactate as a mediator of exercise-induced appetite suppression. American Journal of Physiology-Endocrinology and Metabolism. 2020 Oct 1;319(4):E814-9.
- Vanderheyden LW, McKie GL, Howe GJ, Hazell TJ. Greater lactate accumulation following an acute bout of high-intensity exercise in males suppresses acylated ghrelin and appetite postexercise. Journal of Applied Physiology. 2020 May 1;128(5):1321-8.
- Pedersen MG, Søndergaard E, Nielsen CB, Johannsen M, Gormsen LC, Møller N, Jessen N, Rittig N. Oral lactate slows gastric emptying and suppresses appetite in young males. Clinical Nutrition. 2022 Feb 1;41(2):517-25.

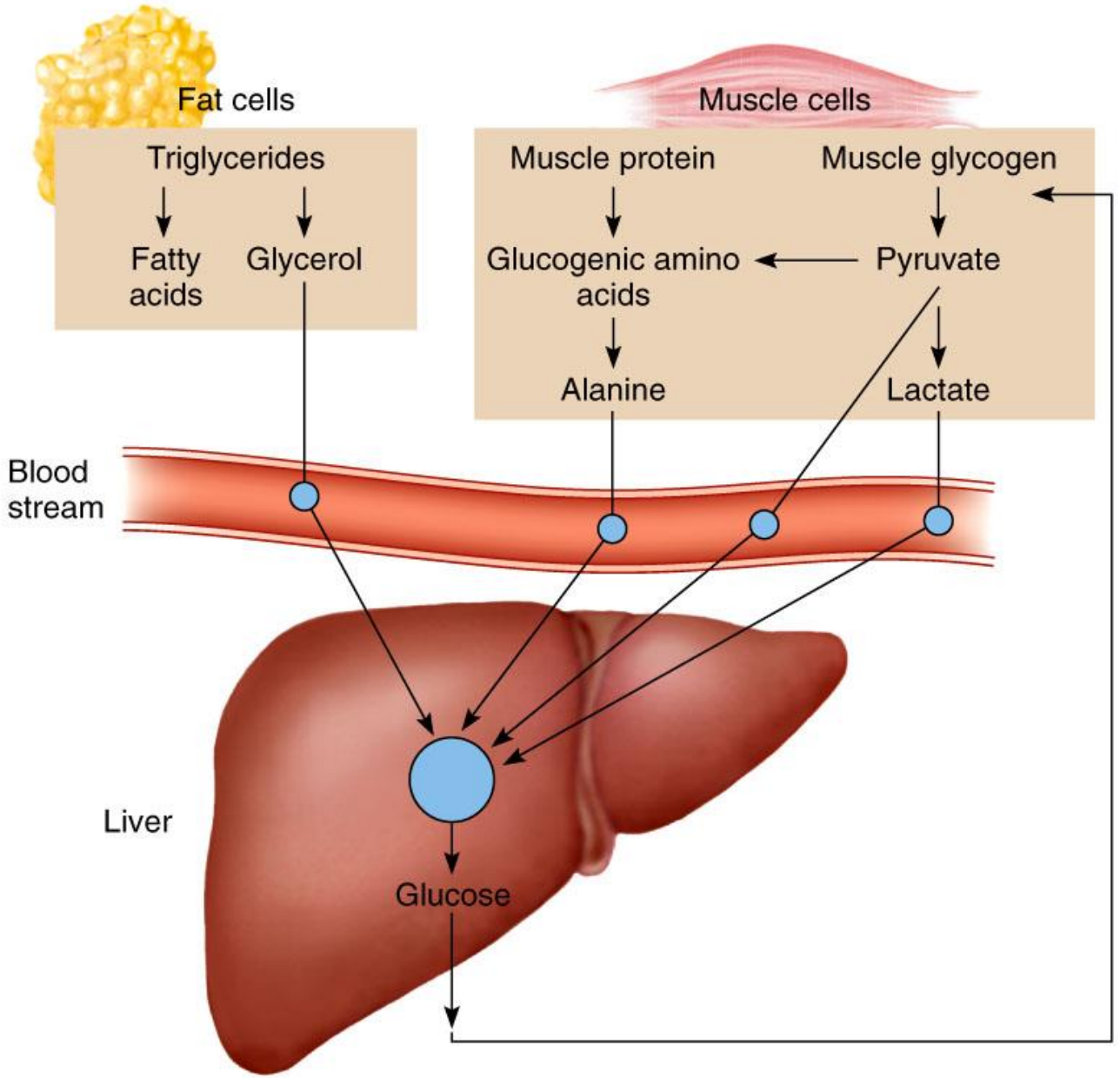

Mechanism 1
GASTRIC CELL
AG
AG
GOAT
?
DG
GPR81
La
BLOOD
Mechanism 2
ARC NEURON
p-Akt
p-STAT3
p-AMPK
POMC
AgRP
La
MCT
La
BLOOD
Mechanism 3
GHSR-1a
AG
ARC NEURON
GHSR-1a signaling
?
POMC
AgRP
MCT
La
To brain & peripheral tissues
MUSCLE CELL
G-6-P
PFK
LDH
La
MCT
La
LDH
TCA
OXPHOS
ATP
BLOOD

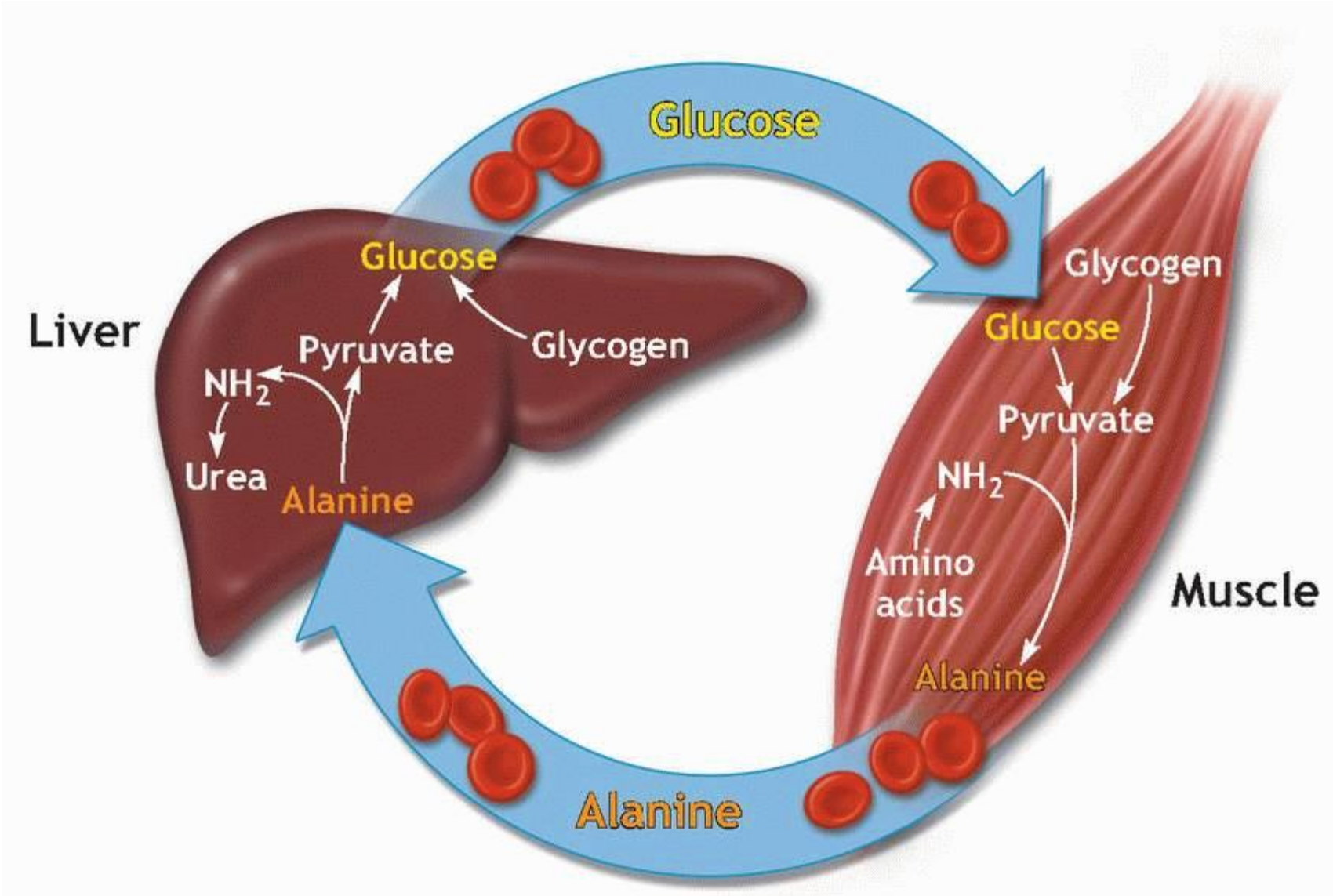
واکنش های مربوط به متابولیسم کربوهیدرات

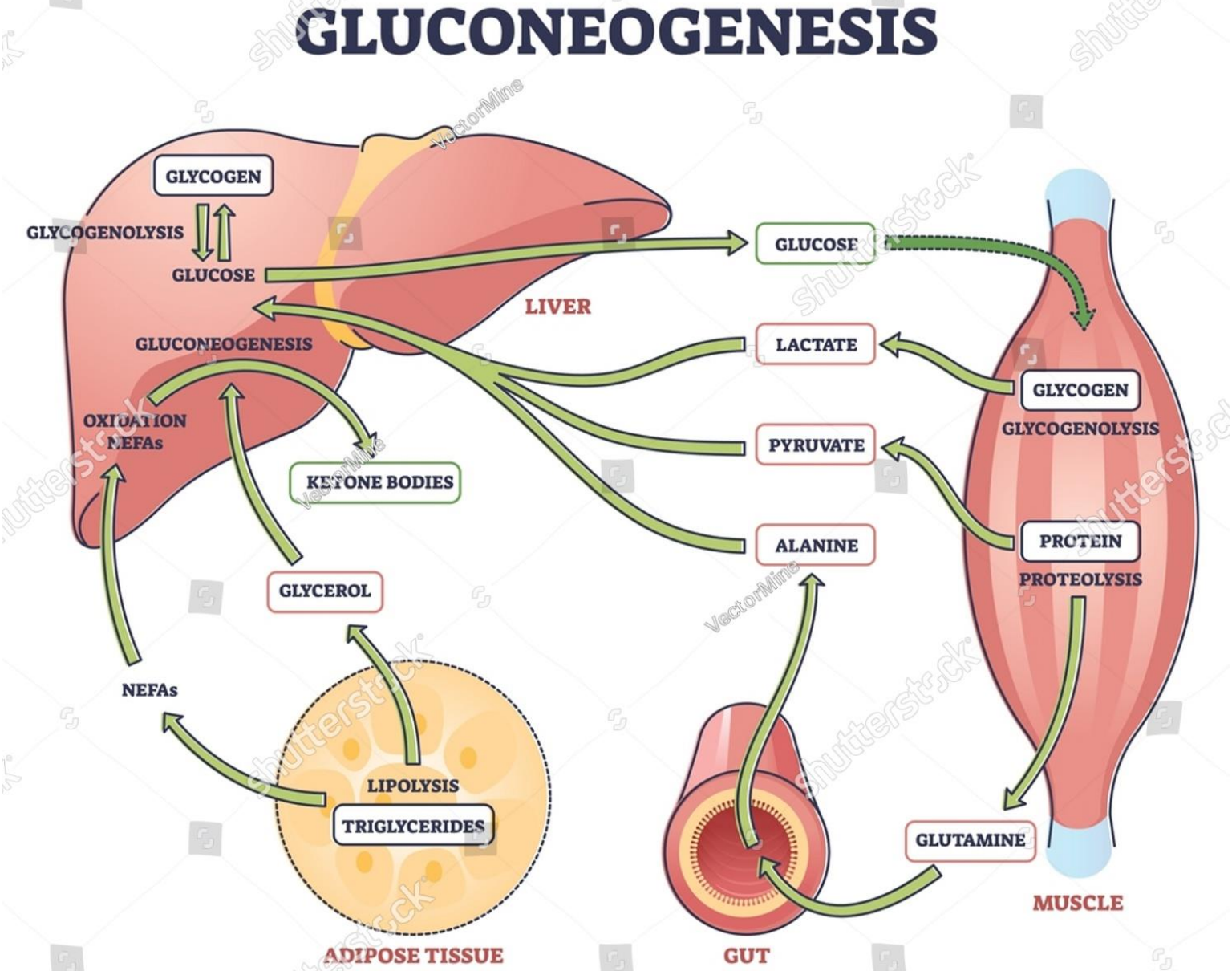
- گلیکوژنز
- گلیکوژنولیز
- گلیکولیز
- گلوکونئوژنز

Designed by: Mohsen Ebrahimi (Assistant Professor Of Semnan University)

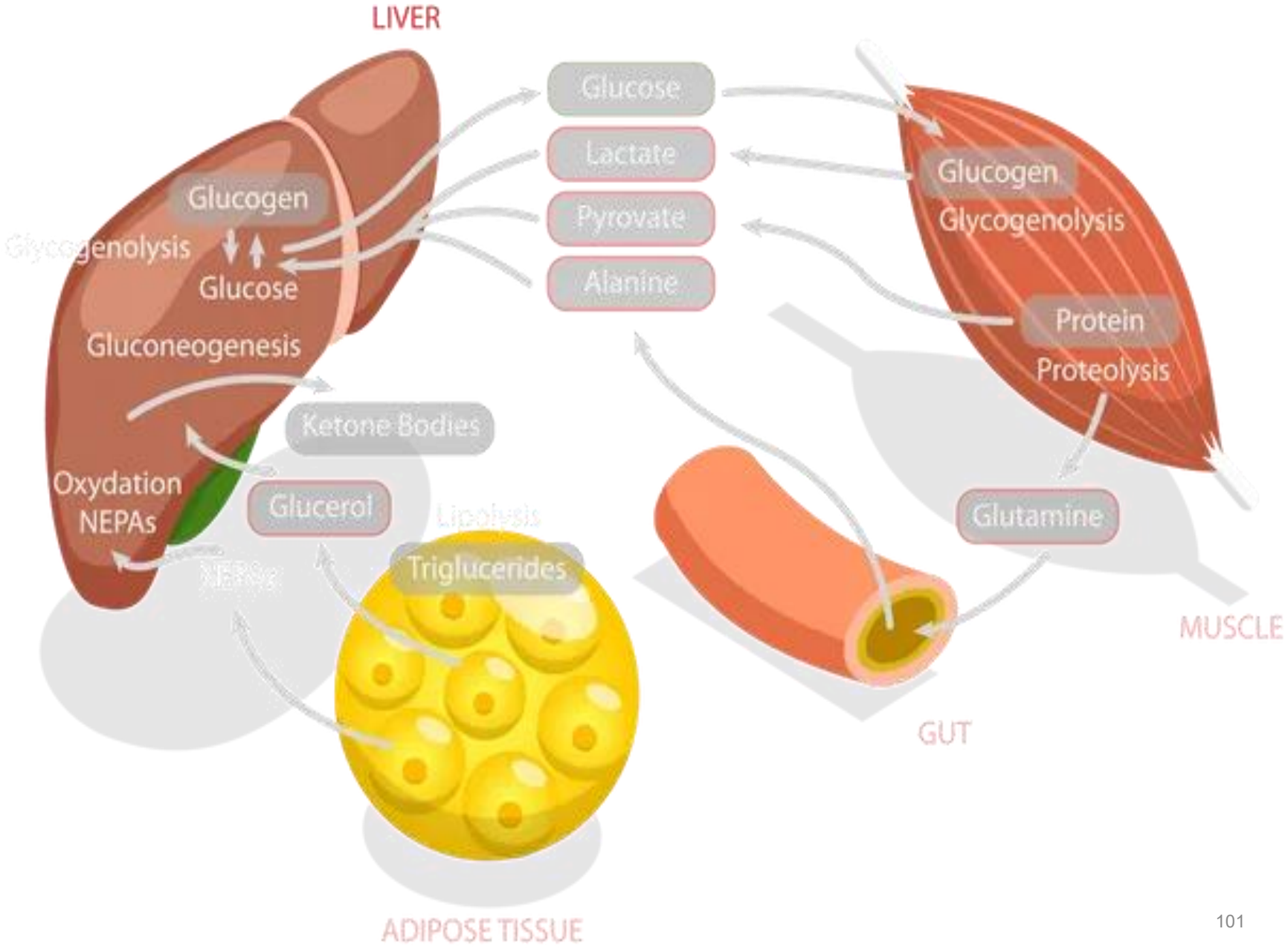
Copyright © The McGraw-Hill Companies, Inc. Permission required for reproduction or display.




Glucose
Liver
Glucose
Pyruvate
Glycogen
NH_2
Urea
Alanine
Glycogen
Glucose
Pyruvate
NH_2
Amino acids
Muscle
Alanine
Alanine



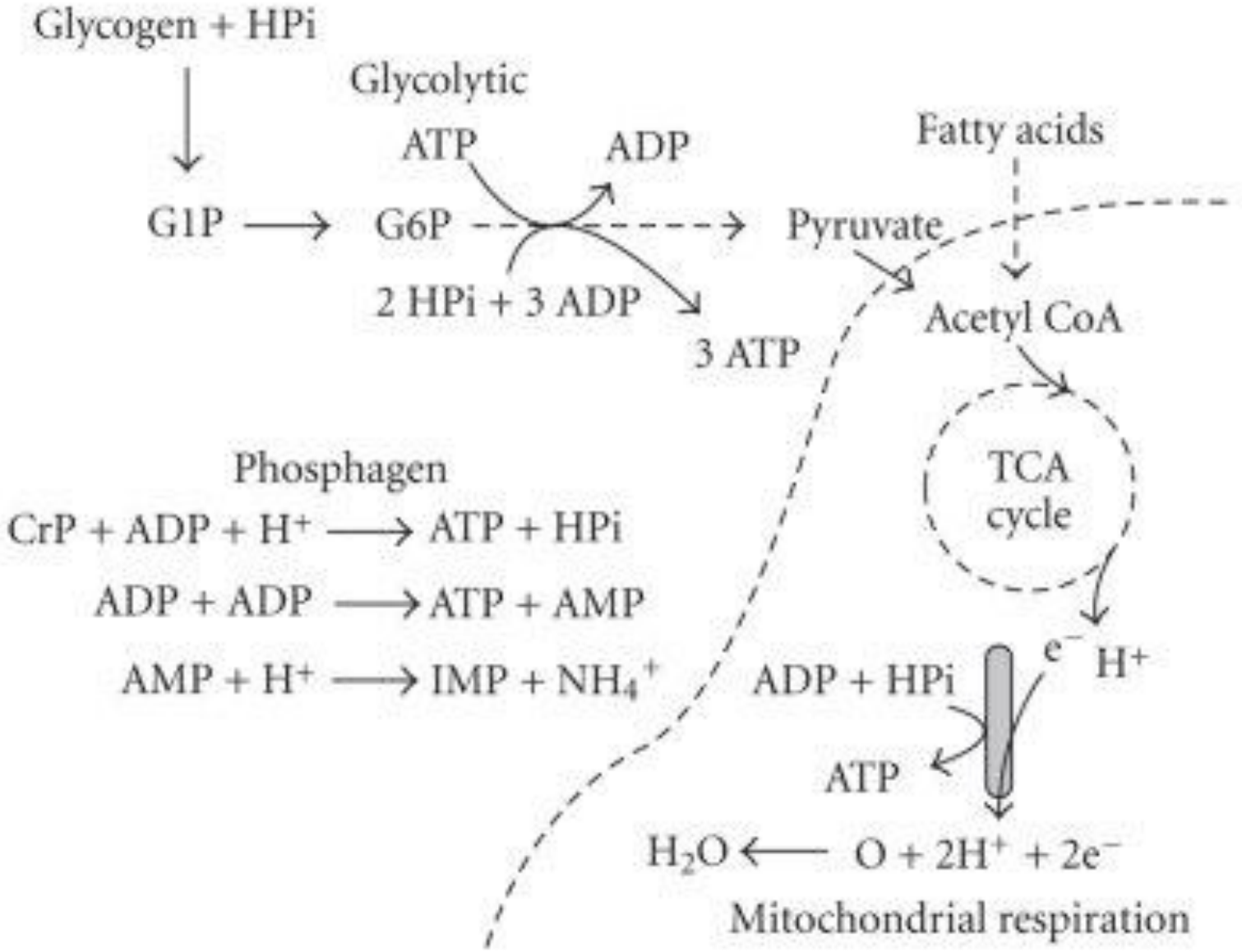
shutterstock
IMAGE ID: 2080170691
www.shutterstock.com


LIVER
Glucose
Lactate
Pyrovate
Alanine
Glucogen
Glycogenolysis
Glucose
Gluconeogenesis
Ketone Bodies
Oxydation
NEPAs
Glucerol
Lipolysis
Triglucerides
NEFAs
ADIPOSE TISSUE
Glucogen
Glycogenolysis
Protein
Proteolysis
Glutamine
MUSCLE
GUT

- در استراحت برون ده گلوکز کبد در حدود ۱۵۰ میلی گرم در دقیقه است که ۶۰ درصد آن از گلیکوژن کبد و ۴۰ درصد آن از گلوکونئوژنز تامین می شود.
- در هنگام فعالیت شدید (بالاتر از ۷۵ درصد Vo2max) برون ده گلوکز کبد به یک گرم در دقیقه می رسد که ۹۰ درصد آن از گلیکوژن کبد می باشد.
- در فعالیت های ورزشی طولانی مدت و گرسنگی سهم نسبی گلوکونئوژنز افزایش می یابد.

Designed by: Mohsen Ebrahimi (Assistant Professor Of Semnan University)

مرور


Glycogen + HPi
Glycolytic
ATP
ADP
G1P
G6P
Pyruvate
Fatty acids
2 HPi + 3 ADP
3 ATP
Acetyl CoA
TCA cycle
Phosphagen
CrP + ADP + H+ ⟶ ATP + HPi
ADP + ADP ⟶ ATP + AMP
AMP + H+ ⟶ IMP + NH4+
ADP + HPi
e−
H+
ATP
H2O ⟵ O + 2H+ + 2e−
Mitochondrial respiration