



مقدمه‌ای بر سلول



شکل‌گیری حیات

۱-۱

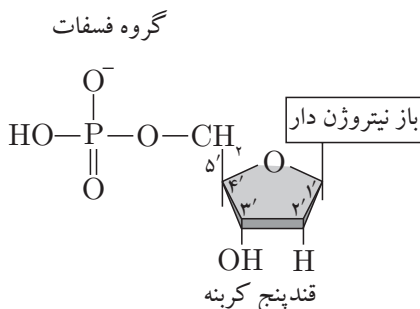
شاید بتوان منشأ حیات را میلیاردها سال پیش، در آب‌های گرفتار در سنگ‌های تازه تشکیل یافته از آتشفشان‌های زیر دریایی جست‌وجو کرد. این آب‌های گرم و قلیایی که سرشار از گوگرد و عناصر دیگر بودند، در تماس با آب‌های اسیدی (به تبعیت از جو احیاکننده‌ی آن دوران) و سرشار از املاح آهن آن روز، زمینه‌ساز شکل‌گیری حیات در حباب‌های سرشار از آهن و گوگرد شدند.

آهن و گوگرد موجود در این حباب‌ها ابتدایی‌ترین کاتالیزورهای حیات محسوب می‌شوند و زمینه‌ساز پیدایش مولکول‌های آلی از واکنش دی‌اکسیدکربن و هیدروژن موجود در حباب‌ها شدند. این مدل‌های کاتالیزوری را می‌توان اجداد آن دسته از آنزیم‌ها دانست که به موجب گروه‌های محتوی آهن و گوگرد در ساختار خود با تسریع واکنش‌های زیستی حیات را ممکن ساخته‌اند. در ادامه‌ی مسیر ایجاد پیچیدگی در مولکول‌های آلی، پیدایش دو دسته از مواد را می‌توان نقطه‌ی عطفی در آغاز شکل‌گیری حیات و پیدایش سلول دانست. گروه اول مولکول‌هایی بودند که توانایی ذخیره‌ی اطلاعات و تکثیر آن را داشتند؛ این توانایی یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های ارگانیسم‌های زنده یعنی تولیدمثل را ممکن می‌ساخت. گروه دوم گروهی از مولکول‌های لیبیدی (چربی) بودند که زمینه‌ساز جدایی دو دنیای زنده و غیرزنده شدند. به تدریج این مولکول‌ها که فسفولیپید نامیده می‌شوند، اطراف حباب‌های آهن - گوگرد را پوشش دادند و بدین شکل امکان ایجاد پیچیدگی، در مولکول‌های به دام افتاده درون این غشاهای زیستی اولیه فراهم شد و سلول‌های اولیه پدید آمدند.

در ادامه با اجزاء مختلف تشکیل دهنده‌ی یک سلول، که زیربنای حیات محسوب می‌شود، آشنا می‌شویم.

ماده‌ی وراثتی و هسته‌ی سلول

۲-۱



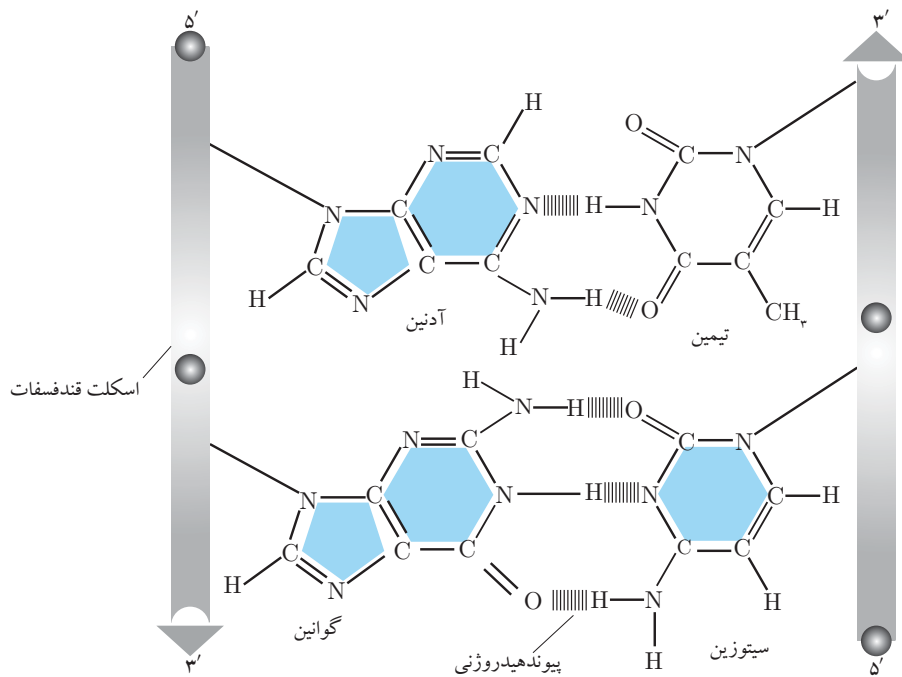
شکل ۱-۱ ساختار یک نوکلئوتید تک فسفات که مونومر ماده‌ی ژنتیک محسوب می‌شود؛ جهت ساخت DNA نوکلئوتیدهای سه فسفات وارد واکنش پلیمریزاسیون می‌شوند که در این جریان دو فسفات خود را از دست می‌دهند. انرژی دو پیوند شکسته شده، انرژی واکنش را تأمین می‌کند. قند و باز آلی با پیوندی موسوم به گلیکوزیدی به هم متصل می‌شوند.

عملکرد سلول را می‌توان تجلی اطلاعاتی دانست که در قالب ماده‌ی وراثتی رهبری سلول را بر عهده دارد. امروزه می‌دانیم این وظیفه را موادی به نام نوکلئیک اسیدها بر عهده دارند. از مدت‌ها پیش ماده‌ی وراثتی سلول را دسته‌ای از این مواد به نام **دئوکسی ریبونوکلئیک اسیدها (DNA)** تشکیل می‌دهد. این مولکول پلیمری است از زیرواحدهایی به نام نوکلئوتید که هر کدام دارای یک قند دئوکسی ریبوز، گروه فسفات و باز آلی می‌باشند (شکل ۱-۱). تفاوت این زیرواحدها تنها در باز آلی آنهاست که می‌تواند آدنین (A)، گوانین (G)، تیمین (T) و سیتوزین (C) باشد.

ساختار DNA به صورت مارپیچی، شکل گرفته از دو رشته است که توسط پیوند هیدروژنی در کنار یکدیگر قرار می‌گیرند. در این ساختار همیشه A از یک رشته با دو پیوند هیدروژنی در مقابل G، T از یک رشته با سه پیوند هیدروژنی در مقابل C از رشته‌ی مقابل است (شکل ۱-۲). از آن‌جا که آدنین و گوانین هر دو مولکولی دوحلقه‌ای (پورین) ولی سیتوزین و تیمین هر دو تک حلقه‌ای (پیریمیدین) هستند قطر مارپیچ در سراسر طولش ثابت است. ترتیب قرار گرفتن این نوکلئوتیدها در زنجیره، همان اطلاعاتی است که در قالب مولکول DNA ذخیره شده و شارش این اطلاعات رهبری سلول را ممکن می‌سازد. چندین ویژگی، مارپیچ DNA را مناسب این وظیفه در سلول ساخته است. از جمله مهم‌ترین آن‌ها می‌توان به **پایداری ساختار** و توانایی قرار گرفتن به عنوان **الگو جهت ساختن مولکولی مشابه** خود اشاره کرد. این دو ویژگی موجب پابرجایی حیات شده و وراثت را با حفظ شدگی قابل توجه ممکن ساخته است.

سؤال. نموداری رسم کنید که رابطه‌ی میزان بقای گونه را با نرخ تغییرات ماده‌ی وراثتی (که تعیین کننده‌ی صفات موجودات زنده است) نشان دهد. به نظر شما در موجودات زنده با سطوح پیچیدگی بالا در دنیای امروز، نسبت به جانداران ساده‌تر در ابتدای حیات این نمودار چه تغییراتی داشته است؟

شواهد حاکی از آن است که در ابتدای حیات، DNA وظیفه‌ی ذخیره کردن اطلاعات را بر عهده نداشته است، بلکه گروهی دیگر از نوکلئیک اسیدها به نام ریبونوکلئیک اسید (RNA) ماده‌ی وراثتی را تشکیل می‌دادند. RNA مولکولی تک رشته‌ای با پایداری کم‌تر نسبت به DNA است. تفاوت اصلی آن‌ها صرفاً در جایگزینی گروه هیدروکسیل کربن شماره‌ی دو، در قند موجود در نوکلئوتیدهای سازنده‌ی RNA،



شکل ۱-۲ ساختار DNA؛ به تعداد پیوند هیدروژنی که میان بازه‌های آلی مکمل شکل می‌گیرد توجه کنید. اتصال مونومرهای سازنده در یک رشته با پیوند فسفودی‌استر صورت می‌گیرد که میان گروه هیدروکسیل متصل به کربن 3' قند یک نوکلئوتید و فسفات متصل به کربن 5' قند نوکلئوتید بعد شکل می‌گیرد.

با هیدروژن در DNA است. پایداری کم‌تر RNA شرایط را برای تغییرات سریع ارگانیسم برای سازش با ناپایداری‌های محیط آن روز مهیا می‌کرد.

ویژگی مهم‌تری که این مولکول نسبت به DNA داشت، توانایی آن در کاتالیز واکنش‌های زیستی و خاصیت آنزیمی بود. البته امروزه نیز هسته‌ی عملکردی بعضی آنزیم‌ها را مولکول‌های RNA تشکیل می‌دهد که این دسته آنزیم‌ها را ریبوزیم^۱ می‌نامند، مانند ریبوزوم و آنزیم‌های مرتبط با پردازش mRNA در یوکاریوت‌ها.

این خاصیت کاتالیزوری اولین نشانه‌های تولیدمثل را، در زمانی که هنوز پیچیدگی در مولکول‌های زیستی ایجاد نشده بود و آنزیم‌ها با عملکرد اختصاصی به وجود نیامده بودند، ممکن ساخت. در واقع این مواد وراثتی می‌توانستند با الگو قرار دادن خود، باعث ایجاد مولکول‌های مشابه شوند. در سلول‌های امروزی تقسیم وظایف، متفاوت است. مولکول‌های RNA واسطه‌ی انتقال اطلاعات ذخیره شده در DNA به پروتئین‌ها هستند. در فصل‌های بعد با جزئیات این فرایندها بیشتر آشنا می‌شویم.

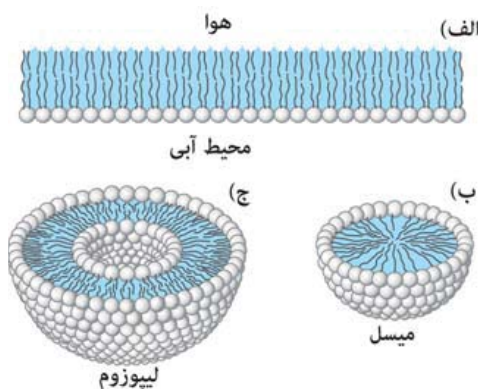
1) Ribozyme

غشاء زیستی

۳-۱

محتویات سلول توسط غشاء زیستی از محیط پیرامون جدا شده است، اما وظایف غشاء پلاسمایی به همین عملکرد سد مانند خلاصه نمی‌شود و غشاء پلاسمایی به عنوان اولین سطح تبادل مواد بین سلول و محیط پیرامون، دارای خاصیت نفوذپذیری انتخابی^۱ است. یعنی بر اساس نیازها به بعضی مواد اجازه عبور می‌دهد و به بعضی دیگر نه. هم‌چنین بخش مهمی از پیام‌رسانی بین سلول‌ها از طریق پروتئین‌های غشا صورت می‌گیرد.

غشاء پلاسمایی به طور عمده از لیپید و پروتئین ساخته شده است. غشا ساختار خود را مدیون گروهی از لیپیدهای دوگانه‌دوست^۲ (با یک سر آب‌دوست^۳ و دم آب‌گریز^۴)، به طور عمده گلیسروفوسفولیپید و اسفنگولیپیدها، است که به صورت **دو لایه** آرایش یافته‌اند. عملکرد غشا عمدتاً بر عهده‌ی پروتئین‌های موجود در ساختار آن است.



شکل ۳-۱ اشکال مختلفی که نمک‌های اسید چرب در محیط آبی به خود می‌گیرند؛ الف) تک لایه‌ی لیپیدی ب) میسل ج) لیپوزوم

نمک‌های اسید چرب ساده‌ترین مولکول‌هایی هستند که در محیط آبی رفتاری شبیه به لیپیدهای دوگانه‌دوست دارند. این مولکول‌ها در صورتی که به آرامی در سطح آب پخش شوند، یک **تک لایه** ایجاد می‌کنند؛ به شکلی که بخش آب‌دوست‌شان رو به محیط آبی و بخش آب‌گریز‌شان در سمت مقابل قرار می‌گیرد. (شکل ۳-۱-الف)

اگر تعدادی از این نمک‌ها توسط آب احاطه شوند، تشکیل ساختاری موسوم به **میسل**^۵ را می‌دهند. میسل کره‌ای است که بخش آب‌دوست مولکول‌ها به سمت محیط قرار گرفته‌اند و بخش‌های آب‌گریز درون کره در کنار هم هستند. (شکل ۳-۱-ب)

گاهی این مولکول‌های دوگانه‌دوست تشکیل حباب‌هایی را می‌دهند که مقداری آب درون دو لایه‌ی لیپیدی (که خود در محیط آبی قرار دارد) گرفتار می‌شود (شکل ۳-۱-ج). در دیواره‌ی این حباب‌ها نمک‌های اسید چرب به شکلی کنار هم قرار گرفته‌اند که بخش آب‌دوست هر لایه در تماس با آب و بخش آب‌گریز دو لایه در مقابل هم باشند.

رفتار لیپیدهای دوگانه‌دوست بسته به **نسبت مقطع عرضی بخش آب‌گریز به آب‌دوست**، متفاوت است. در مورد لیزوفسولیپیدها که فقط یک اسید چرب در بخش آب‌گریز دارند، تجمع دم‌های آب‌گریز در مرکز

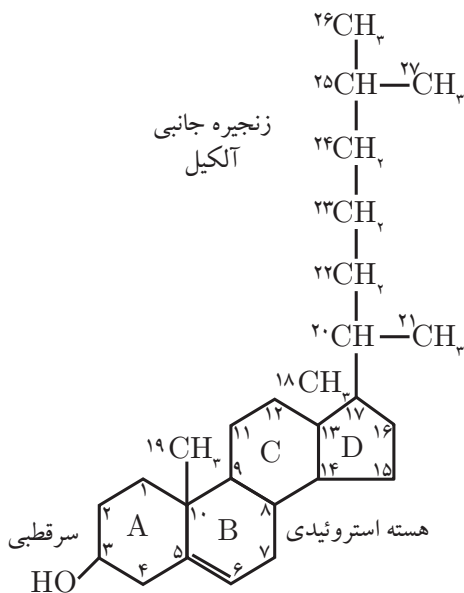
1) Selective permeability 2) Amphipathic 3) Hydrophobic 4) Hydrophobic 5) Micelle

میسل ساختاری پایدارتر ایجاد می‌کند. از سوی دیگر گلیسروفوسفولیپید و اسفنگولیپیدها که در آن‌ها سطح مقطع دو بخش تقریباً برابر است، تمایل بیشتری به تشکیل حباب‌هایی با جدار دولایه، موسوم به لیپوزوم^۱ دارند. لیپوزوم‌ها ساختاری مشابه ساختار غشاء سلول دارند.

عضو دیگر غشاء سلول **کلسترول** است. این مولکول

از یک سر قطبی و یک دم به شدت آب‌گریز تشکیل شده که بین آن‌ها ساختارهای حلقوی متصل به هم قرار دارد. (شکل ۱-۴)

کلسترول، موجب تعادل در میزان سیالیت غشا می‌شود. بدین معنی که در موارد افزایش سیالیت فسفولیپیدهای غشا، مثلاً به علت افزایش دما، در جهت کاهش سیالیت عمل می‌کند و در مواردی که به علت کاهش دما فسفولیپیدهای غشا سیالیت کم‌تری یابند موجب افزایش سیالیت می‌شود. ترکیب فسفولیپیدهای غشا نیز بر سیالیت تأثیرگذار است. هر چه اسیدهای چرب موجود در ساختار آن‌ها کوتاه‌تر و اشباع نشده‌تر باشد سیالیت بیشتر می‌شود. سلول به کمک این روش‌ها سیالیت غشاء را تنظیم می‌کند.



شکل ۱-۴ ساختار یک مولکول کلسترول؛ یکی از اجزاء مهم غشا که در تنظیم سیالیت نقش دارد.

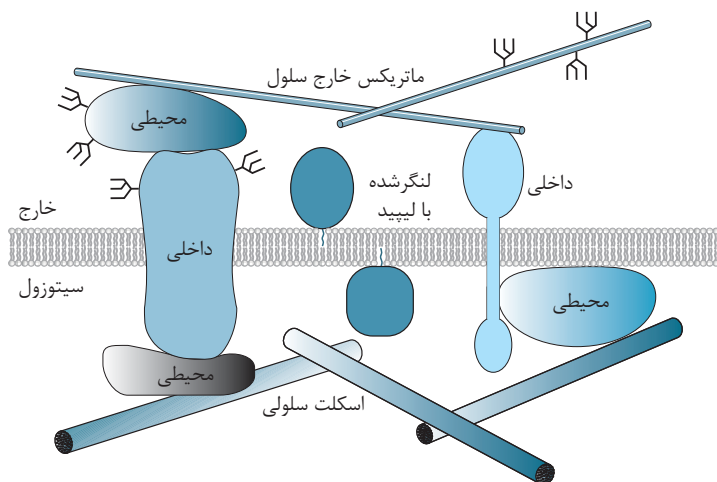
غشا را می‌توان موزائیکی سیال از پروتئین‌ها در یک بستر فسفولیپیدی دانست. پروتئین‌ها که عمده عملکرد غشا را بر عهده دارند، از لحاظ فرم قرارگیری، در غشا به دو گروه تقسیم می‌شوند: (شکل ۱-۵)

۱. پروتئین‌های داخلی: این پروتئین‌ها که درون دو لایه لیپیدی قرار گرفته‌اند، دارای بخش‌های غنی از آمینواسیدهای آب‌گریز هستند که با بخش‌های آب‌گریز میانی غشا برهم‌کنش دارند.

گروهی از این پروتئین‌ها سراسر عرض غشا را پل می‌زنند. هم‌چنین بعضی از آن‌ها بخش‌هایی در سطح غشا دارند و پروتئین‌های دوگانه‌دوست نامیده می‌شوند.

۲. پروتئین‌های محیطی: این دسته از پروتئین‌ها بر سطح غشاء پلاسمایی قرار دارند و با بخش آب‌دوست لیپیدهای غشا و یا پروتئین‌های داخلی، پیوند هیدروژنی و یا یونی برقرار می‌کنند.

1) Liposome 2) Integral protein 3) Peripheral protein



شکل ۵-۱ طرز قرارگیری پروتئین‌های مختلف در غشا؛ در این شکل پروتئین‌های داخلی، محیطی و ارتباط آن‌ها را با اجزاء درون سلول و ماتریکس خارج سلولی مشاهده می‌کنید. توجه کنید که گروهی از پروتئین‌های محیطی به صورت مستقیم و گروه دیگر با واسطه‌ی پروتئین‌های داخلی به غشا متصل هستند.

۴-۱ پروکاریوت‌ها و یوکاریوت‌ها

ع-۱

بر اساس ویژگی‌های میکروسکوپی، سلول‌ها را می‌توان به دو گروه پروکاریوت^۱ و یوکاریوت^۲ تقسیم کرد. این دسته‌بندی بر اساس حضور و یا عدم حضور ساختار مجزایی متشکل از دو لایه غشا است که ماده‌ی وراثتی را در بر می‌گیرد. این ساختار هسته^۳ (در لاتین: کاریون) نامیده می‌شود که فقط در سلول‌های یوکاریوت دیده می‌شود (eu به معنای حقیقی و pro به معنای ابتدایی).

پروکاریوت‌ها سلول‌های ساده، کوچک و اولیه هستند که باکتری‌ها^۴ و آرکی‌باکتری‌ها^۵ را شامل می‌شوند. صرف‌نظر از ساختارهای ساده‌ی چند سلولی با سازمان اندک، پروکاریوت‌ها به صورت مجزا و تک‌سلولی زندگی می‌کنند. در پروکاریوت‌ها حفاظت و شکل سلول وابسته به دیواره‌ی سلولی است که اطراف غشا را احاطه می‌کند. ماده‌ی ژنتیک پروکاریوت‌ها در ناحیه‌ای به نام نوکلئوئید^۶، در ارتباط نزدیک با غشا قرار دارد، این ماده‌ی ژنتیک به صورت یک DNA حلقوی است.

محیط زیست آرکی‌باکتری‌ها طیف گسترده‌ای (شامل چشمه‌های آب گرم، اعماق اقیانوس‌ها و حتی روده‌ی گاو) را در بر می‌گیرد. فرایندها و دستگاه‌های آنزیمی مرتبط با شارش اطلاعات ژنتیکی در آرکی‌باکتری‌ها، در قیاس با باکتری‌ها، شباهت بیشتری با سلول‌های یوکاریوت دارد. بنابراین به نظر می‌رسد از لحاظ تکاملی یوکاریوت‌ها به آرکی‌باکتری‌ها قرابت بیشتری دارند.

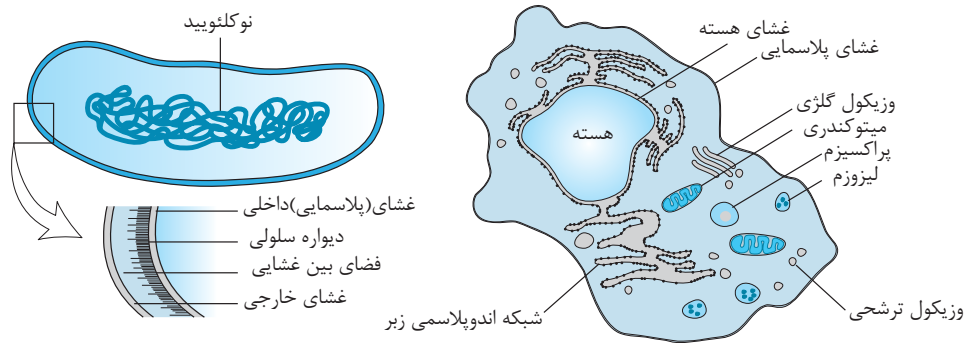
یوکاریوت‌ها سلول‌های بزرگ و پیچیده‌تری هستند. علاوه بر هسته (که یک یا چند کروموزوم* خطی فشرده را در بر می‌گیرد)، اندامک‌های غشادار متعددی جهت انجام وظایف اختصاصی در فضای میان

1) Prokaryote 2) eukaryote 3) Nucleus 4) Bacteria 5) Archaeobacteria 6) Nucleoid

* ماده‌ی ژنتیک سلول در واحدهایی موسوم به کروموزوم قرار می‌گیرد.



غشا و هسته (سیتوپلاسم) به وجود آمده است. اسکلت سلولی سازمان یافته، پایداری شکل سلول، حرکت سلول و اندامک‌های درون آن و هم‌چنین برخی فرایندهای اختصاصی یوکاریوت‌ها مانند فرو خوردن (فاگوسیتوز^۱) سلول‌ها و ذرات خارجی را ممکن ساخته است. در شکل ۱-۶ دو نوع سلول پروکاریوت و یوکاریوت را مشاهده می‌کنید.



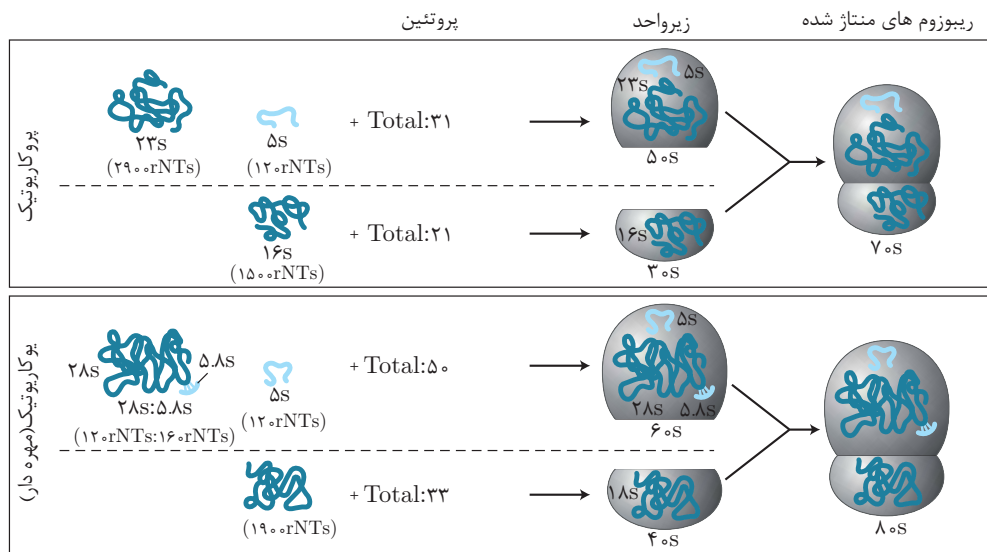
شکل ۱-۶ سلول پروکاریوتی و یوکاریوتی؛ در این تصویر ساختار و اجزاء دو سلول نمونه از این دو گروه را مشاهده می‌کنید. سلول‌های پروکاریوت در رنگ‌آمیزی گرم به دو گروه گرم مثبت و منفی تقسیم می‌شود. در این شکل ساختار یک سلول گرم منفی را مشاهده می‌کنید که دارای یک غشاء خارجی است و در مقابل ضخامت دیواره (به سبب کم بودن ضخامت لایه پپتیدوگلیکان) کم‌تر است.



ریبوزوم^۲ را می‌توان از ساده‌ترین اندامک‌های سلولی دانست که عملکرد آن ترجمه‌ی اطلاعات ذخیره شده در نوکلئیک اسیدها (که از DNA به نوع خاصی از RNA به نام mRNA - RNA پیام‌بر - منتقل و در اختیار ریبوزوم قرار می‌گیرد) به توالی اسیدآمینو در پلی‌پپتیدها است. ریبوزوم یک ریبوزیم غول‌پیکر است. بدین معنی که بخش اصلی و تعیین‌کننده‌ی ساختار و عملکرد آن را دسته‌ای از مولکول‌های RNA، به نام rRNA (ریبوزومی) تشکیل می‌دهد و پروتئین‌ها بیش‌تر در نقش یک ماده‌ی سیمانی به عملکرد rRNA کمک می‌کنند. ریبوزوم پروکاریوت‌ها و یوکاریوت‌ها شباهت ساختاری و عملکردی زیادی دارند. هر دو از زیرواحد کوچک و بزرگ تشکیل شده‌اند. زیرواحد کوچک به عنوان قالبی جهت خواندن اطلاعات mRNA عمل می‌کند و زیرواحد بزرگ تشکیل پیوند پپتیدی را در پلی‌پپتید در حال سنتز، کاتالیز می‌کند. در شرایط عدم فعالیت، دو زیرواحد به صورت جدا از هم هستند و در هنگام خواندن mRNA دو زیرواحد متصل می‌شوند.

از طرف دیگر ریبوزوم پروکاریوت‌ها از لحاظ اندازه و اجزاء سازنده، تفاوت‌هایی هم با ریبوزوم یوکاریوتی دارد. ریبوزوم یوکاریوتی (۸۰ s) از دو زیرواحد ۶۰ s و ۴۰ s تشکیل شده است در حالی که ریبوزوم پروکاریوت‌ها (۷۰ s) کوچک‌تر بوده و دو زیرواحد ۳۰ s و ۵۰ s دارد. (شکل ۱-۷)

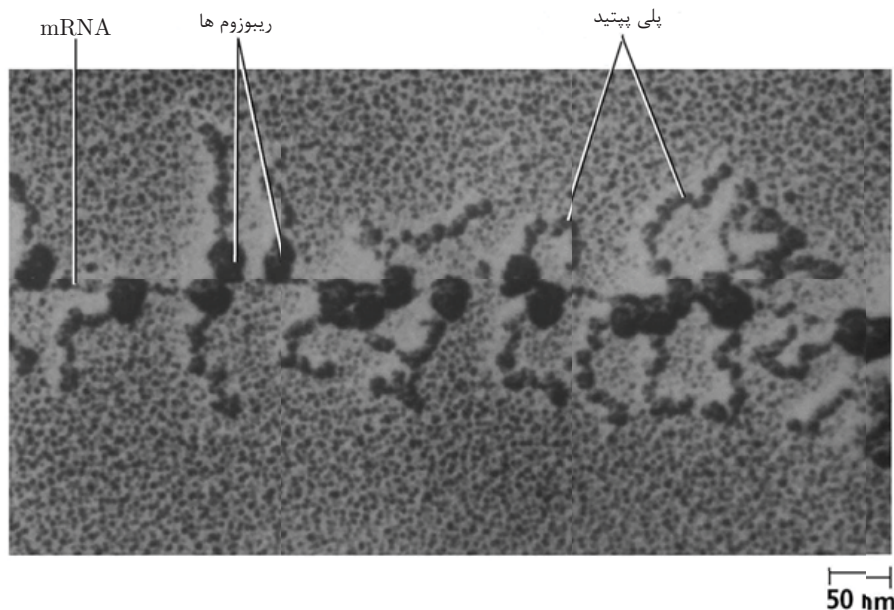
1) Phagocytosis 2) Ribosome



شکل ۷-۱ ساختار و اجزاء تشکیل دهنده دو نوع ریبوزوم پروکاریوتی و یوکاریوتی؛ هر واحد ریبوزوم شامل مجموعه‌ای از پروتئین‌های گوناگون و یک یا چند مولکول rRNA است. از اتصال دو زیرواحد بزرگ و کوچک، ریبوزوم شکل می‌گیرد.

توجه کنید که s، واحد svedberg، ضریب رسوب ذرات در اولترا سانتریفیوژ است و در مورد زیرواحد‌های یک پروتئین خاصیت جمع‌پذیری ندارد.

هنگامی که یک mRNA در حال ترجمه است معمولاً به صورت هم‌زمان در دسترس چندین ریبوزوم قرار می‌گیرد و به صورت ساختاری متشکل از چند ریبوزوم در کنار هم موسوم به پلی‌ریبوزوم دیده می‌شود. (شکل ۸-۱)



شکل ۸-۱ پلی‌ریبوزوم؛ چندین ریبوزوم که در حال ترجمه‌ی یک مولکول mRNA هستند.



ریبوزوم‌هایی که پروتئین‌های سیتوزول را می‌سازند به صورت آزاد در سیتوزول هستند. اما پروتئین‌های غشایی و یا ترشحی توسط ریبوزوم‌هایی که به شبکه‌ی آندوپلاسمی زبر متصلند، ساخته می‌شوند.

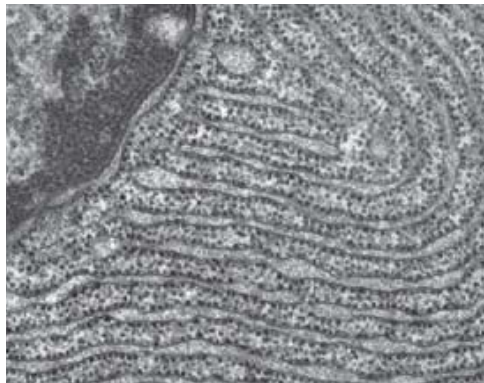


شبکه‌ی آندوپلاسمی

۶-۱

نیمی از غشاء سلول یوکاریوتی در قالب شبکه‌ی آندوپلاسمی^۱ (ER) حدود ۱۰٪ از حجم سلول را از سایر محتویات سیتوزول جدا می‌کند، فضایی که لومن^۲ شبکه‌ی آندوپلاسمی نامیده می‌شود. این غشا در ادامه‌ی **غشاء خارجی هسته** است. شبکه‌ی آندوپلاسمی به صورت شبکه‌ای از کیسه‌ها و لوله‌های منشعب دیده می‌شود که به یکدیگر مرتبطند. ساختار و عملکرد شبکه‌ی آندوپلاسمی در همه‌ی بخش‌های آن یکسان نیست.

در بعضی قسمت‌ها ریبوزوم‌ها به غشاء شبکه متصلند و پلی‌پپتیدهای در حال سنتز را به روش **cotranslation** (به معنی هم‌زمان با ترجمه در مقابل **post translation** به معنی پسا ترجمه‌ای، که روش ورود پروتئین‌ها به اندامک‌هایی مانند کلروپلاست، میتوکندری، هسته و پراکسیزوم است) وارد لومن ER می‌کنند. در ادامه این پلی‌پپتیدها متحمل تغییراتی از جمله گلیکوزیلاسیون (اتصال آنزیمی قند) می‌شوند، تا می‌خورند و به یکدیگر متصل می‌شوند تا ساختار پروتئین دارای عملکرد ایجاد شود. این بخش ER به علت حضور ریبوزوم‌ها، در زیر میکروسکوپ به صورت زبر دیده می‌شود. به همین دلیل آن را **شبکه‌ی آندوپلاسمی زبر (RER)**^۳ می‌نامند. (شکل ۱-۹)



شکل ۱-۹ شبکه‌ی آندوپلاسمی زبر زیر میکروسکوپ؛ به قرارگیری ریبوزوم‌ها بر روی شبکه‌ی آندوپلاسمی توجه کنید.

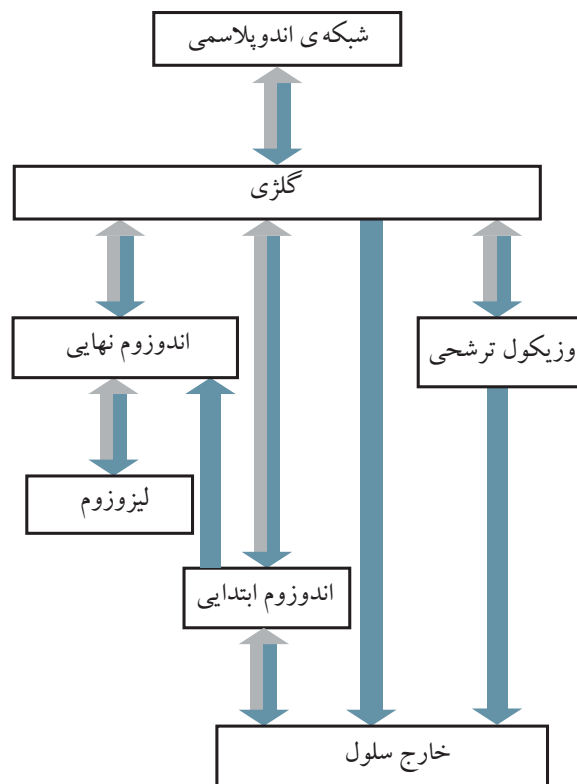
مناطق کوچکی از شبکه‌ی آندوپلاسمی فاقد ریبوزوم بوده و **شبکه‌ی آندوپلاسمی صاف (SER)** نامیده می‌شود. بخشی از ER که وزیکول‌های محتوی لیپید و پروتئین‌های تازه سنتز شده از آن جوانه می‌زنند نیز (تا به سمت جسم گلژی بروند) جز SER محسوب می‌شود و شبکه‌ی آندوپلاسمی انتقالی^۴ (TER) نام دارد.

1) Endoplasmic reticulum 2) Lumen 3) Rough endoplasmic reticulum 4) Transitional endoplasmic reticulum

علاوه بر این، شبکه‌ی آندوپلاسمی صاف وظایف متعدد اختصاصی‌تری بر عهده دارد. سلول‌هایی که از لحاظ متابولیسم لیپیدها فعالند، برای مثال هورمون‌های استروئیدی سنتز می‌کنند، شبکه‌ی آندوپلاسمی صاف بسیار گسترده‌ای دارند که با داشتن آنزیم‌های این مسیر بر غشاء خود، جایگاه انجام این واکنش‌هاست. شبکه‌ی آندوپلاسمی صاف سلول‌های کبد در سم‌زدایی خون از داروها و متابولیت‌های سمی نقش دارد. این مواد در فرم محلول در چربی در بدن تجمع پیدا می‌کنند و موجب مسمومیت می‌شوند. آنزیم‌های موجود در SER کبد، با تبدیل این ترکیبات به فرم محلول در آب موجب افزایش دفع این مواد توسط کلیه می‌شوند. SER در این سلول‌ها هم‌چنین در تولید جز لیپیدی لیپوپروتئین‌های خون نقش دارند.

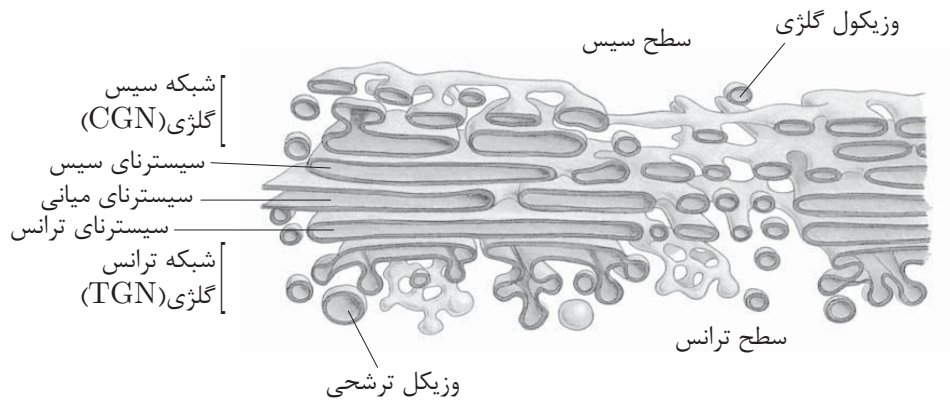
عملکرد دیگری که SER در اکثر سلول‌های یوکاریوتی بر عهده دارد، ذخیره‌ی یون کلسیم است. SER به صورت فعال Ca^{2+} سیتوزول را وارد لومن خود می‌کند و در مواقع لزوم با رها کردن آن موجب افزایش Ca^{2+} سیتوزول می‌شود. در سلول عضله‌ی اسکلتی میزان زیادی از نوعی SER اختصاصی، به نام شبکه‌ی سارکوپلاسمی وجود دارد که به طور ویژه با ذخیره و رها سازی Ca^{2+} ، در شروع انقباض نقش دارد.

شبکه‌ی آندوپلاسمی و دستگاه غشایی که با این اندامک در ارتباط است (شکل ۱-۱۰) در ساخت و تأمین غشاء سلول نقش دارد.



شکل ۱-۱۰ ارتباط دستگاه غشایی درون سلول

هر جسم گلژی^۱ مجموعه‌ای از ۵ تا ۶ کیسه‌ی پهن غشایی موسوم به سیتسترنای^۲ است (شکل ۱-۱۱) که توسط ارتباطات توبولی (لوله‌ای شکل) به یکدیگر متصل شده‌اند. هر جسم گلژی دو سطح دارد: **سیس**، که وزیکول‌های ارسالی از ER را می‌پذیرد و **ترانس**، که مواد ورودی، پس از تغییراتی که بر آن‌ها صورت می‌گیرد، در قالب وزیکول‌هایی جوانه می‌زنند و از این سطح خارج می‌شوند:



شکل ۱-۱۱ جسم گلژی؛ سطح سیس وزیکول‌ها را به طور عمده از شبکه‌ی آندوپلاسمی دریافت می‌کند. پس از پردازش محتوای درون این وزیکول‌ها، ارسال به مقصد نهایی از سطح ترانس صورت می‌گیرد.

پروتئین‌هایی که از سمت سیس وارد گلژی می‌شوند، ابتدا در شبکه‌ی سیس گلژی^۳ قرار می‌گیرند و متحمل **تغییراتی در الیگوساکاریدهای متصل** می‌شوند. این تغییرات در هر سیتسترنای طی انتقال به سمت ترانس ادامه می‌یابد و پروتئین برای عملکرد نهایی خود آماده می‌شود. پروتئین‌های پردازش شده، در شبکه‌ی ترانس گلژی^۴ در وزیکول‌ها بسته‌بندی و به مقصد نهایی فرستاده می‌شوند. هر سیتسترنای در جسم گلژی دارای مسئولیت مشخص و در نتیجه مجموعه‌ای از آنزیم‌های خاص و ثابت است و با سیتسترنای قبل و بعد متفاوت می‌باشد.

تغییراتی که بر زنجیره‌ی اولیگوساکاریدی صورت می‌گیرد توالی و ترتیب مشخصی دارد. به نظر می‌رسد آنزیم‌های مسئول در وظایف جسم گلژی، همگی در غشاء این اندامک جای دارند. سلول‌هایی که جهت ترشح گلیکوپروتئین‌ها* اختصاصی شده‌اند دارای شبکه‌ی گلژی گسترده‌ای هستند؛ از جمله سلول‌های گابلت در اپیتلیوم روده که موکوس ترشح می‌کنند. (شکل ۱-۱۲)

1) Golgi apparatus 2) cisterna (cicternae) جمع آن: 3) Cis golgi network 4) Trans golgi network

* گلیکوپروتئین و پروتئوگلیکان هر دو ترکیباتی متشکل از قند و پروتئین هستند با این تفاوت که در مورد اول غالبیت با جزء پروتئینی است در حالی که در مورد اخیر قند غالبیت دارد.

وظیفه‌ی دیگری که این اندامک بر عهده دارد، میزبانی **سرهم‌بندی پروتئوگلیکان‌ها** است که اکثراً به بیرون سلول ترشح می‌شوند و در ساختمان ماتریکس خارج سلولی قرار می‌گیرند یا به صورت متصل به غشا در سطح بیرونی سلول قرار می‌گیرد.

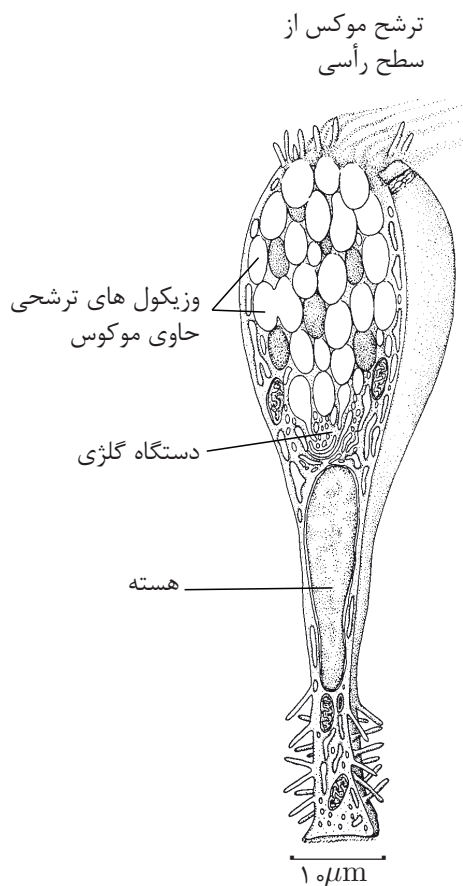
سازمان‌دهی و پایداری ساختار جسم گلژی به کمک **میکروتوبول‌ها** (از اجزاء اسکلت سلولی) و **ماتریکس سیتوپلاسمی گلژی**^۱ (در نقش داربستی سیسترنهای مجاور را در کنار هم نگه می‌دارد) صورت می‌گیرد. دیده شده حتی در صورت عدم الحاق وزیکول‌های جوانه زده از ER، جهت تشکیل جسم گلژی، پروتئین‌های ماتریکس در نزدیکی سانتروزوم تجمع می‌یابند که مؤید نقش این پروتئین‌ها در تشکیل جسم گلژی در جایگاه اصلی خود است (با سانتروزوم در ادامه آشنا می‌شویم).

هم‌چنین این پروتئین‌ها مانع می‌شوند که وزیکول‌های جوانه زده در بین سیسترن‌ها، از گلژی دور شوند. در هنگام تقسیم سلول با فسفریله شدن این پروتئین‌ها و در نتیجه جدا شدن از جسم گلژی، این اندامک در سراسر سیستوزول پخش می‌شود. این مسئله در **تقسیم متعادل جسم گلژی** میان دو سلول دختری اهمیت دارد.

دو مکانیسم برای جابه‌جایی پروتئین‌ها بین سیسترن‌های مجاور مطرح شده است:

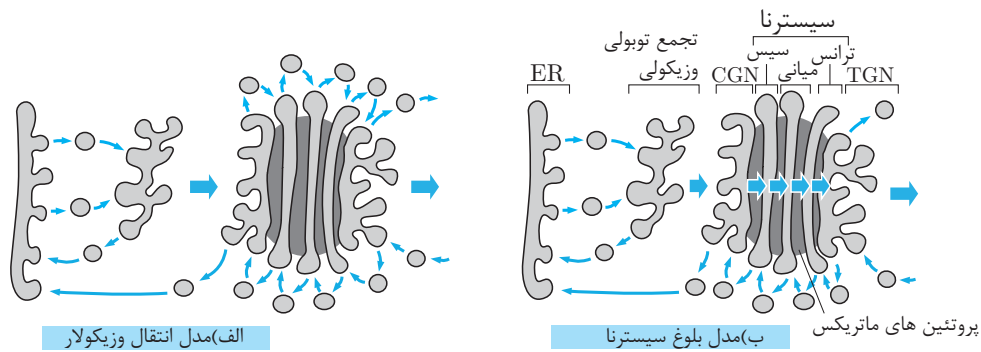
(الف) مدل انتقال وزیکولار:^۲ طبق این مدل سیسترن‌های گلژی ساختارهای ثابتی هستند که پروتئین‌های در حال پردازش، در وزیکول‌هایی بین آن‌ها جابه‌جا می‌شوند و در هر یک، توسط آنزیم‌هایی که در غشاء اندامک قرار دارند، پردازش می‌شوند. در مورد جابه‌جایی وزیکول‌ها بین سیسترن‌ها در این مدل دو فرضیه وجود دارد: جابه‌جایی جهت‌دار و غیرجهت‌دار. در فرم اخیر جابه‌جایی وزیکول‌ها به صورت تصادفی است. اما از آن‌جا که وزیکول‌ها از سمت سیس وارد و از ترانس خارج می‌شوند برآیند جهت حرکت وزیکول‌ها رو به ترانس است. (شکل ۱-۱۳-الف)

1) Cytoplasmic golgi matrix 2) Vesicular transport model



شکل ۱-۱۲ سلول گابلت؛ ترشح کننده‌ی موکوس در روده.

(ب) مدل بلوغ سیسترننا^۱: در این مدل، سیسترنناها وضعیت دینامیک دارند، بدین ترتیب که هر سیسترننا بعد از انجام فعالیتش به جایگاه بعدی منتقل می‌شود و آنزیم‌های مورد نیاز آن توسط وزیکول‌هایی، از سیسترننایی که قبلاً در آن جایگاه بوده است وارد می‌شوند. از یک سو وزیکول‌هایی که از ER آمده‌اند به یکدیگر ملحق می‌شوند و شبکه‌ی سیس را می‌سازند و از سوی دیگر شبکه‌ی ترانس گلژی به وزیکول‌هایی شکسته می‌شود که به سمت جایگاه عمل خود در سراسر سلول می‌روند. (شکل ۱-۱۳-ب)



شکل ۱-۱۳ دو مدل انتقال مواد میان سیسترنناهای مجاور در گلژی؛ الف) مدل انتقال وزیکولار ب) مدل بلوغ سیسترننا

سؤال. به نظر شما ساخته شدن کلاژن در سلول فیبروبلاست از کدام مدل حمایت می‌کند؟ چرا؟ (راهنمایی: کلاژن پروتئین بسیار بزرگی است و در وزیکول‌های کوچک جا نمی‌شود).
گلیکوزیله شدن مرحله به مرحله، موجب **تا خوردن پروتئین** با ترتیب و توالی خاص برای رسیدن به ساختار مناسب را موجب می‌شود و هم‌چنین مانع به هم چسبیدن و رسوب پروتئین‌هایی می‌شود که هنوز تا نخورده‌اند. وجود ساختار الیگوساکاریدی وظایف مرتبط با عملکرد پروتئین را هم بر عهده دارد. مثلاً در پروتئین‌های سطح سلول و آنزیم‌های لیزوزومی **مانع آسیب** و قرار گرفتن در معرض آنزیم‌های پروتئولیتیک می‌شود. از سایر وظایف این گروه‌های کربوهیدراتی می‌توان نقش **پوشش موسینی**، **اتصالات بین سلولی** و ... را نام برد.

سؤال. اضافه شدن الیگوساکاریدها چگونه مانع تجمع و رسوب پروتئین‌های تا نخورده می‌شود؟ (راهنمایی: در یک پروتئین تا خورده اکثر بخش‌های آب‌گریز، درون ساختار انتشار داده می‌شوند).



لیزوزوم

۸-۱

لیزوزوم^۲ اندامکی غشادار با بیش از ۴۰ آنزیم است که در هضم ماکرومولکول‌ها نقش دارد. آنزیم‌ها و پروتئین‌های غشاء لیزوزوم، اختصاصی این اندامک هستند. این ویژگی موجب شده که بتوان این اندامک

1) Cisternal maturation model 2) Lysosome

را با آنتی‌بادی ویژه رنگ‌آمیزی کرد. در نتیجه با وجود تفاوت بسیار در شکل و اندازه می‌توان آن‌ها را به عنوان یک اندامک واحد شناخت.

آنزیم‌های لیزوزوم هیدرولازهای اسیدی هستند، بدین معنی که جهت داشتن عملکرد به محیط اسیدی نیاز دارند؛ در نتیجه در صورت ریختن محتویات این اندامک به درون سیتوزول، توانایی تجزیه‌ی محتویات سلول را ندارند. محیط اسیدی درون لیزوزوم توسط نوع خاصی پمپ هیدروژن ایجاد می‌شود که با مصرف ATP، یون هیدروژن را از سیتوزول به لومن لیزوزوم منتقل می‌کند.



در گیاهان ساختارهای شبه‌لیزوزومی بزرگی به نام واکوئل^۱ وظایف مشابه را بر عهده دارند. واکوئل بیش از ۳۰٪ تا ۹۰٪ حجم سلول را اشغال می‌کند (شکل ۱-۱۴). علاوه بر نقش هیدرولیتیکی، واکوئل محل ذخیره‌ی مواد غذایی و متابولیت‌های زائد است. در سلول‌های گیاهی واکوئل‌ها به حفظ فشار تورگر^۲ سلول (فشاری که از طرف دیواره به سلول وارد می‌شود و در موارد پژمردگی از بین می‌رود) کمک می‌کند. نقش‌های اختصاصی بسیاری برای واکوئل شناخته شده که از توضیح آن چشم می‌پوشیم.

شکل ۱-۱۴ واکوئل؛ یک ساختار شبه - لیزوزومی محسوب می‌شود و در سلول‌های گیاهی حجم زیادی از سلول را اشغال می‌کند.

جهت ورود موادی که باید توسط لیزوزوم تجزیه شوند، سه مسیر عمده وجود دارد:

در مسیر اول موادی که با اندوسیتوز (به جز فاگوسیتوز) وارد سلول شده‌اند، توسط وزیکول‌هایی به اندامک درون سلولی بدون شکلی به نام اندوزوم ابتدایی^۳ برده می‌شود. اندوزوم ابتدایی، آنزیم‌های هیدرولیتیک لیزوزومی را نیز به واسطه‌ی وزیکول‌هایی که از گلژی می‌آیند دریافت می‌کند. در این مرحله ماکرومولکول‌های اندوسیتوز شده برای اولین بار با آنزیم‌های هیدرولیتیک روبه‌رو می‌شوند. در مرحله‌ی بعد آنزیم‌ها و گیرنده‌هایی که همراه وزیکول وارد سلول شده‌اند و هم‌چنین بعضی از مواد هضم شده، به واسطه‌ی وزیکول‌هایی به غشا باز می‌گردند. اندوزوم که اکنون اندوزوم نهایی^۴ نام دارد. به لیزوزوم ملحق می‌شود و تشکیل اندولیزوزوم^۵ را می‌دهد. با الحاق تعداد بیش‌تری لیزوزوم مواد موجود در اندولیزوزوم تجزیه می‌شوند

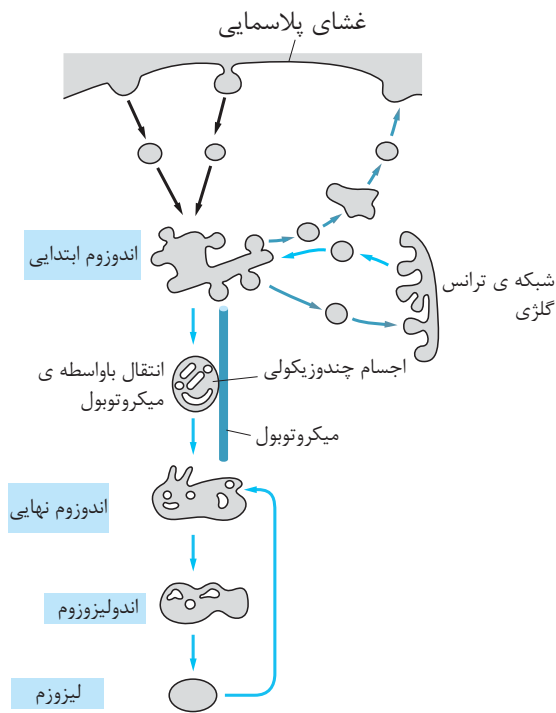
2) Vacuole

2) Turgor pressure

3) endosome Early

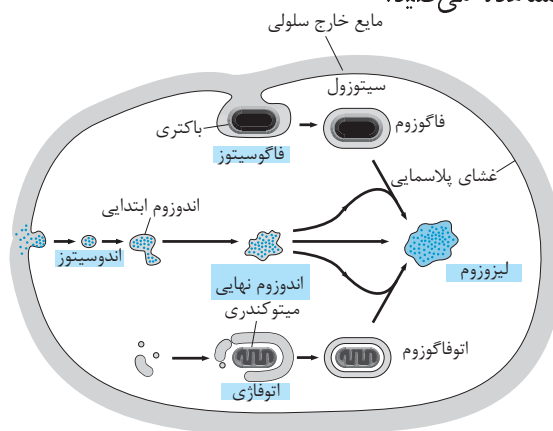
4) Late endosome

5) Endolysosome



شکل ۱-۱۵ هضم توسط لیزوزوم؛ در این شکل مراحل ورود مواد اندوسیتوز شده به درون لیزوزوم را می‌بینید. غشاء اندوزوم در حال مهاجرت به درون جوانه می‌زند و اجسام چندوزیکولی را تشکیل می‌دهد. میکروتوبول از اجزاء اسکلت سلولی است که در ادامه با آن آشنا می‌شوید.

تا آن‌جا که فقط مقدار کمی مواد دیر هضم باقی بماند. اندامک در این مرحله لیزوزوم نامیده می‌شود (شکل ۱-۱۵). پروتئین‌های غشایی مربوط به اندوزوم به واسطه‌ی وزیکول‌هایی مجدداً به اندوزوم باز می‌گردند. در مسیر دوم ذرات بزرگ و میکروارگانیسم‌های کوچک توسط سلول بلع (فاگوسیتوز) و در قالب ساختار غشاداری به نام فاگوزوم، به لیزوزوم برده می‌شوند تا هضم صورت گیرد. این مسیر در سلول‌های سیستم ایمنی مانند ماکروفاژ و نوتروفیل، که فاگوسیتوز باکتری‌ها و ارگانیسم‌های مهاجم را بر عهده دارند، دیده می‌شود. مسیر سوم مسئول بازگرداندن مواد اندامک‌ها و اجزای معیوب و از کار افتاده‌ی سلول، به شکل قابل استفاده‌ی مجدد برای سلول است. اندامک معیوب طی فرایندی موسوم به «اتوفازی» توسط دو لایه غشا (که منشاء آن مشخص نیست) احاطه می‌شود و تشکیل یک اتوفازوزوم را می‌دهد. در مرحله‌ی بعد اتوفازوزوم به لیزوزوم ملحق شده و اندامک معیوب در معرض آنزیم‌های هیدرولیتیک قرار می‌گیرد و ادامه‌ی مسیر مشابه دو مسیر قبیل است. خلاصه‌ای از این سه مسیر را در شکل ۱-۱۶ مشاهده می‌کنید.

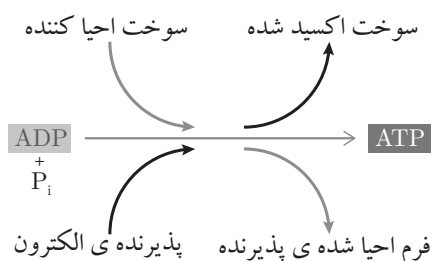


شکل ۱-۱۶ سه مسیر عمده‌ی ورود مواد به لیزوزوم

زنجیره انتقال الکترون

۹-۱

به نظر می‌رسد سلول‌های اولیه، پروکاریوت‌هایی بودند که از مواد آلی با خاصیت احیاکنندگی* زیاد (این مواد توسط واکنش‌های شیمیایی که در خارج سلول انجام می‌پذیرفت، تولید می‌شدند) برای تولید انرژی استفاده می‌کردند. طی واکنشی که تخمیر نامیده می‌شود، الکترون این مواد به مواد آلی با درجه‌ی احیاکنندگی پایین‌تر منتقل می‌شد (در نتیجه‌ی آن، ماده‌ی آلی اول به طور نسبی اکسید** می‌شد). از انرژی آزاد شده طی این واکنش برای ساخت ATP، با فرایند فسفوریلاسیون، استفاده می‌شد. ATP به عنوان واحد انرژی سلول عمل می‌کند. ماده‌ی آلی پذیرنده‌ی الکترون نیز پس از احیا شدن، همراه با ماده‌ی اکسید شده به عنوان ماده‌ی زائد به بیرون سلول منتقل می‌شد (شکل ۱-۱۷). از جمله مهم‌ترین این مواد زائد در باکتری‌های امروزی لاکتیک اسید، فرمیک اسید، استیک اسید و سوکسینیک اسید است.



شکل ۱-۱۷ تولید ATP با فرایند تخمیر

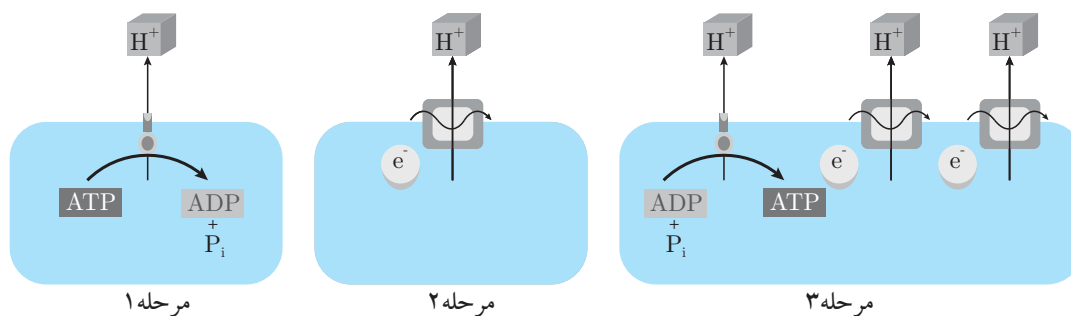
با ادامه‌ی این روند، انتظار می‌رود محیط زندگی میکروارگانیسم با بیرون راندن اسیدهای آلی، به تدریج اسیدی شود. افزایش H^+ در محیط منجر به ورود این یون به درون سلول و اسیدی شدن آن می‌شود که تداخل با واکنش‌های زیستی و در نهایت مرگ سلول را در پی خواهد داشت. در مقابل این فشار، به تدریج برخی از میکروارگانیسم‌ها توانستند بخشی از انرژی موجود در ATP را جهت خارج ساختن H^+ از سلول به کار برند. این عمل گرچه حیاتی بود اما با مصرف انرژی سلول، راندمان تولید انرژی را کاهش می‌داد.

منابع انرژی با مصرف بیشتر، با کمبود روبه‌رو شد. در این زمان گروهی از میکروارگانیسم‌ها صاحب انواعی از پروتئین‌های غشایی شدند که از انرژی انتقال الکترون، میان دو ماده‌ی آلی با درجه‌ی احیاکنندگی متفاوت، جهت پمپ H^+ به بیرون سلول استفاده می‌کردند. به تدریج گروهی از این سلول‌ها توانستند به جای استفاده از مواد مصرفی در فرایند تخمیر، از مواد غیرقابل تخمیر به عنوان دهنده‌ی الکترون (جهت پمپ H^+ به خارج سلول) استفاده کنند. این ویژگی در شرایط کمبود مواد تخمیرپذیر یک حسن تکاملی محسوب می‌شد.

* ماده‌ای با الکترون پرانرژی که تمایل دارد این الکترون را به مولکول دیگری منتقل کند و این مولکول اخیراً اکسیدکننده نامیده می‌شود.

** اکسیداسیون به واکنش‌هایی اطلاق می‌شود که در جریان آن یک ماده الکترون از دست می‌دهد که معمولاً با از دست دادن هیدروژن یا ترکیب شدن با اکسیژن همراه است احیا شدن واکنشی عکس این فرایند است.

اما اوج تکامل این سیستم زمانی بود که با افزایش کارایی انتقال الکترون بین دو ماده، سلول‌ها توانستند، بیش از آن‌چه جهت عدم مسمومیت نیاز است، H^+ را به بیرون پمپ کنند. حال با بازگشت بخشی از H^+ (در جهت شیب الکتروشیمیایی به درون سلول) از میان پمپ H^+ وابسته به ATP (در جهت عکس عملکرد آن تا پیش از این)، **ATP ساخته می‌شد**. این سیستم به تأمین انرژی سلول کمک می‌کرد (شکل ۱-۱۸). با کاهش مواد قابل تخمیر این گروه اخیر در اکثریت قرار گرفتند.

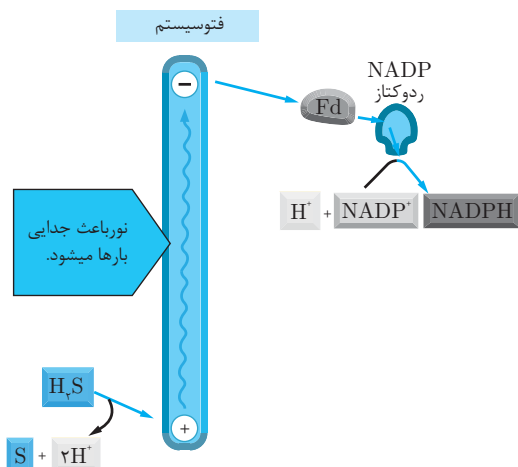


شکل ۱-۱۸ مراحل تکامل زنجیره‌ی انتقال الکترون در سلول‌های پروکاریوتی؛ مرحله ۱، استفاده از انرژی ATP جهت پمپ پروتون به خارج سلول. مرحله ۲، استفاده از انرژی حاصل از انتقال الکترون میان دو ماده جهت پمپ پروتون به خارج سلول. مرحله ۳، افزایش کارایی جهت ایجاد شیب الکتروشیمیایی و استفاده از آن در مسیر سنتز ATP.

با ادامه‌ی روند کاهش مواد آلی احیا کننده در محیط، بقای حیات با تهدید روبه‌رو شد. بنابراین چاره‌اندیشی برای یافتن مسیری جهت تولید این مواد آلی (در مقابل تأمین آن‌ها از محیط اطراف) الزام بیش‌تری می‌یافت. در جو آن روز CO_2 مورد نیاز جهت تأمین کربن مواد آلی از جمله کربوهیدرات‌ها، به فراوانی یافت می‌شد که با احیاء آن، سلول قادر به ذخیره‌ی انرژی بود.

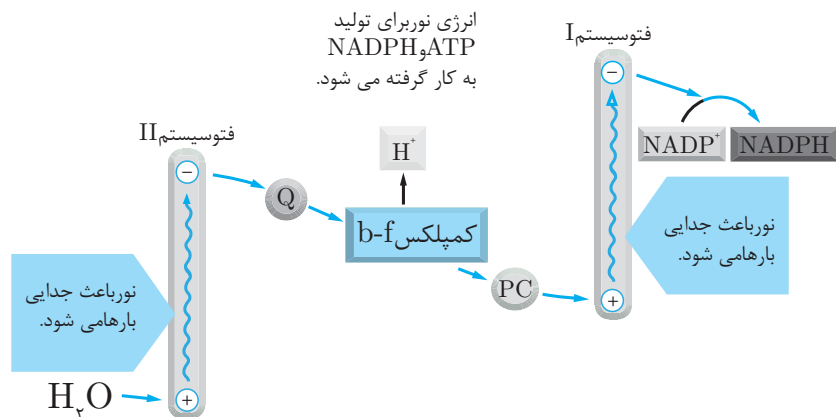
با کاهش مواد آلی احیا کننده، مواد غیرآلی با خاصیت احیاکنندگی پایین (مانند H_2O و H_2S) جهت تأمین الکترون و هیدروژن باقی می‌ماند. اما الکترون این مواد انرژی کافی جهت احیای کربن موجود در CO_2 را نداشت. با رخداد یک پدیده‌ی تکاملی کلیدی، سلول‌ها توانستند از انرژی نورانی جهت افزایش انرژی این الکترون‌ها استفاده کنند. این پدیده پیدایش فتوسنتز^۱ها بود، که می‌توانستند فوتون‌های نوری را جذب و واکنش انتقال الکترون را کاتالیز کنند. در واقع فوتون نوری با به راه انداختن زنجیره‌ی انتقال الکترون، بر خلاف جهتی که پیش از این گفته شد، الکترون را به سطوح بالاتر انرژی منتقل می‌کرد. (شکل ۱-۱۹)

1) Photosystem



شکل ۱-۱۹ استفاده از انرژی نورانی جهت افزایش انرژی الکترون در فتوسیستم؛ الکترون پر انرژی به کمک چندین ناقل الکترون (که یکی از مهم‌ترین آن‌ها پروتئینی آهن‌دار موسوم به فرودکسین $-Fd-$ است) توسط آنزیم $NADP^+$ ردوکتاز به $NADPH^+$ منتقل و آن را به $NADPH$ احیا می‌کند به عنوان یک حامل الکترون پر انرژی در سلول عمل می‌کند. الکترون از دست رفته‌ی فتوسیستم نیز به واسطه‌ی تجزیه‌ی H_2S تأمین می‌شود.

ماده‌ای که به عنوان دهنده‌ی الکترون استفاده می‌شود در ابتدا H_2S بود. از آن جایی که انرژی لازم برای انتقال الکترون از H_2O به $NADP^+$ (مولکولی با قدرت احیاکنندگی بالا)، در مقایسه با انتقال از H_2S به $NADP^+$ ، بیش‌تر است؛ انتقال از H_2O با در کنار هم قرار گرفتن دو فتوسیستم مربوط به دو ارگانیسم متفاوت، (باکتری سبز «فتوسیستم I» و باکتری ارغوانی «فتوسیستم II») در مسیر انتقال الکترون ممکن شد. این سیستم در سیانوباکتری‌ها دیده می‌شود. در این مسیر O_2 به عنوان متابولیت از سلول خارج می‌شود (شکل ۱-۲۰). بنابراین، فتوستنز اکسیژنیک نام دارد.

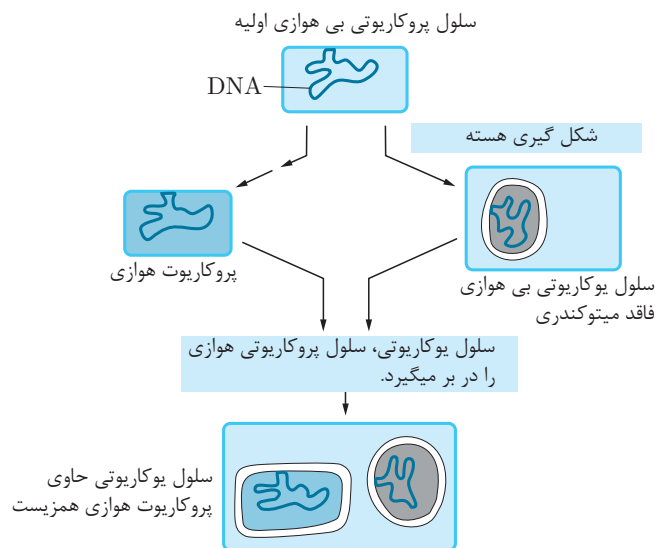


شکل ۱-۲۰ کلروپلاست گیاه و سیانوباکتری

با گسترش این گروه از میکروارگانیسم‌ها غلظت O_2 در جو به سرعت افزایش یافت. اکسیژن به علت فعال بودن و توانایی بالا در اکسید کردن، برای سلول سمی بود.

به عنوان یک مکانیسم دفاعی، گروهی از باکتری‌ها به جای انتقال الکترون حاصل از اکسیداسیون $NADP^+$ (که حامل الکترون است) پس از پذیرفتن الکترون، جهت احیای مواد در واکنش‌های درون سلول از جمله احیای کربن به کار می‌رود، این ماده در فرم احیا شده $NADPH$ نامیده می‌شود.

مواد پرانرژی به مولکول‌های آلی، این الکترون را در زنجیره‌ی انتقال الکترون به اکسیژن منتقل کردند؛ واکنشی که منجر به تولید مولکول آب می‌شود. علاوه بر کارآمدتر شدن زنجیره‌ی انتقال الکترون، اکسیژن سمی نیز خنثی می‌شد. بدین شکل **تنفس هوازی** شکل گرفت. یوکاریوت‌های اولیه شکارچیان بودند با متابولیسم بی‌هوازی، که با تغذیه از پروکاریوت‌ها و فرایند تخمیر انرژی خود را تأمین می‌کردند. احتمالاً منشأ کلروپلاست و میتوکندری را باید در این سبک زندگی جست‌وجو کرد. به نظر می‌رسد بعضی پروکاریوت‌های قادر به تنفس هوازی، که طی فرایند فاگوسیتوز وارد سلول یوکاریوت شده بودند، در مقابل هضم توسط این سلول‌ها مقاومت کردند. باقی ماندن این پروکاریوت‌ها درون سلول یوکاریوت زمینه‌ساز شکل‌گیری نوعی درون - هم‌زیستی شد که به شکل‌گیری اندامکی به نام میتوکندری^۱ انجامید. سلول یوکاریوت از ATP ساخته شده طی تنفس هوازی (در پروکاریوت که اکنون میتوکندری نامیده می‌شود) استفاده می‌کرد، و از سوی دیگر مواد آلی پرانرژی توسط سلول یوکاریوت که شکارچی کارآمدتری بود، در اختیار میتوکندری قرار می‌گرفت. (شکل ۱-۲۱)



شکل ۱-۲۱ شکل‌گیری میتوکندری مطابق تئوری درون هم‌زیستی

گروهی از یوکاریوت‌های شکارچی در مسیری مشابه، نوعی دیگر از درون - هم‌زیستی را با پروکاریوتی که فتوسنتز اکسیژنیک داشت، شکل دادند و در پی آن کلروپلاست^۲ ایجاد شد. این اتفاق هم‌زمان بود با جدایی دو فرمانروی گیاهان و جانوران. کلروپلاست اندامک مخصوص سلول‌های گیاهی و جلبک‌هاست، که در مقابل تولید کربوهیدرات مورد نیاز سلول، محافظت شده و مواد مورد نیاز خود را از سلول دریافت می‌کند. به تدریج سنتز برخی آنزیم‌های مورد نیاز این دو اندامک از دستگاه ژنتیکی درون اندامک، به سلول یوکاریوت منتقل شد. این آنزیم‌ها و پروتئین‌ها پس از ساخته شدن در سیتوپلاسم وارد اندامک می‌شوند.

1) Mitochondria 2) Chloroplasts

شواهدی در دفاع از این تئوری تکاملی وجود دارد:

۱. این اندامک‌ها دو غشا دارند که ترکیب فسفولیپیدها و پروتئین‌ها در غشاء داخلی مشابه خویشاوندان باکتریایی و در غشاء خارجی مشابه غشاء سلول یوکاریوت (در واقع حاصل از فاگوزوم در برگیرنده‌ی سلول پروکاریوت) است.
۲. دستگاه ژنتیکی و وجود چندین DNA حلقوی بر منشاء پروکاریوتی این دو اندامک دلالت دارد.
۳. درون این دو اندامک ریبوزوم‌هایی وجود دارد که از نظر ساختار و اندازه، مشابه ریبوزوم‌های پروکاریوتی هستند.

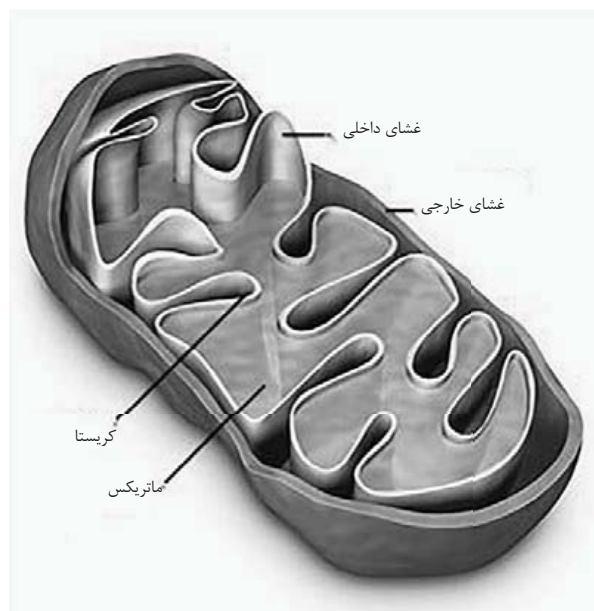
سؤال. شما با کدام سناریو موافق هستید؟ ۱. سلول یوکاریوت و پروکاریوت فاگوسیتوز شده با تغییراتی که در آن‌ها پدیدار می‌شد، سعی در حداکثر استفاده از طرف مقابل داشتند که این رقابت منجر به شکل‌گیری هم‌زیستی شد. ۲. باید با لطافت بیشتری به این رابطه نگاه کنیم. سلول پروکاریوت که بخشی از محصولات خود را در اختیار یوکاریوت قرار می‌داد، به عنوان تشکر! بخشی از مواد مورد نیاز خود را از سلول یوکاریوت دریافت کرد و رابطه به این شکل تکامل یافت. دلیل خود را شرح دهید.

در ادامه با ساختار این دو اندامک پیش‌تر آشنا می‌شویم.

میتوکندری

۱۰-۱

اندامکی استوانه‌ای شکل است که قابلیت تحرک و تغییر شکل دارد. در میتوکندری دو غشاء دیده می‌شود (شکل ۱-۲۲).



شکل ۱-۲۲ ساختار میتوکندری؛ اندامکی با دو غشا، غشاء خارجی صاف و غشاء داخلی چین‌خورده.