

مگنتوزوم‌ها



قطب‌نماهایی درون باکتری‌ها

بهارک بلالایی

دبیر زیست‌شناسی ناحیه ۱ رشت

دانشجوی کارشناسی ارشد ژنتیک، دانشگاه تربیت مدرس

اشاره

آنچه می‌خوانید دریچه‌ای است رو به شناخت بیشتر ویژگی‌های ساختاری و توانایی‌های زیستی برخی سلول‌های پروکاریوتی و مکملی است برای فصل دوم کتاب زیست‌شناسی و آزمایشگاه ۱.

کلیدواژه‌ها: مگنتوزوم، باکتری‌های مگنتوتاکتیک، معدنی‌سازی، AMB-۱، MSR-۱، جزیره مگنتوزومی، اپرون mamABE.

مقدمه

سلول‌ها، اعم از پروکاریوت‌ها و یوکاریوت‌ها، با مجموعه‌ای از چالش‌های مشابه مواجه هستند که برای رویارویی با آن‌ها نیاز به بخش‌های داخل سلولی دارند. نخست، موجود زنده به‌منظور رسیدن به شکل و اندازه مطلوب نیازمند غشای سلولی است؛ دوم، بخش مذکور باید با مجموعه‌ای متناسب از پروتئین‌ها همراه شود که فعالیت اندامک را امکان‌پذیر کند و سوم، سلول باید موقعیت یابی صحیح، محافظت و تفکیک این بخش‌ها را طی چرخه سلولی تضمین کند.

سلول‌های یوکاریوتی این مراحل دشوار مکانیکی را با به‌کارگیری مسیرهای مولکولی اختصاصی به انجام می‌رسانند. بنابراین، اگر ارتباطی بین اندامک‌های یوکاریوتی و پروکاریوتی موجود باشد، منظر احتمالی آن است که ارتباطات این مولکول‌ها، ممکن است متضمن تولید زیستی و محافظت از اندامک‌های پروکاریوتی باشد [۵].

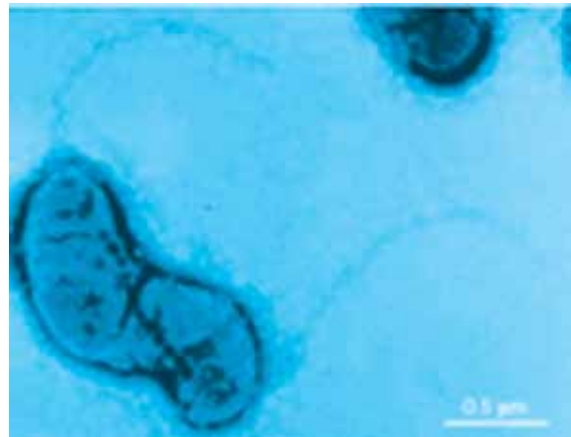
اندامک‌های پروکاریوتی به‌طور عموم و بر مبنای لایه غشایی احاطه‌کننده آن‌ها، به دو گروه اصلی تقسیم‌بندی می‌شوند: گروه اول، ساختارهایی سلولی که توسط یک غشای غیرپیوسته از قبیل یک پوشش پروتئینی یا تک‌لایه لیپیدی پوشیده شده‌اند. شناخته‌شده‌ترین مثال‌ها از چنین ساختارهایی عبارت‌اند از: اجسام لیپیدی ۱، گرانول‌های پلی‌هیدروکسی بوتیرات ۲، کربوکسی زوم‌ها ۳ و واکوئل‌های گازی ۴. دومین دسته، شامل اندامک‌هایی هستند که توسط غشای دو لایه لیپیدی احاطه شده‌اند و عبارت‌اند از: مگنتوزوم‌ها ۵، غشاهای فتوسنتزی ۶ و ساختارهای غشایی داخلی پلانکتومیست‌ها ۷ [۵].

مگنتوزوم‌ها درون باکتری‌ها

باکتری‌های مگنتوتاکتیک^۸ پروکاریوت‌های متحرک و عمدتاً آبزی‌ای هستند که در امتداد خطوط ژئومگنتیک^۹ تحرک دارند. همه باکتری‌های مگنتوتاکتیک، ساختارهای خاص درون سلولی موسوم به مگنتوزوم تولید می‌کنند [۱۰]. مگنتوزوم باکتری‌های مگنتوتاکتیک^{۱۱} یکی از خیره‌کننده‌ترین قسمت‌های سلول پروکاریوتی است (شکل ۱). باکتری‌های مگنتوتاکتیک، یک گروه فیلوژنتیک از پروکاریوت‌ها هستند که قادرند از خطوط مغناطیسی زمین به‌عنوان راهنما در جست‌وجوی موقعیت مکانی مطلوب استفاده کنند. این رفتار، به واسطه به‌کارگیری یک اندامک مغناطیسی خاص موسوم به مگنتوزوم قابل حصول است. یک مگنتوزوم از غشای دو لایه لیپیدی^{۱۱} [۵] به

ضخامت ۴-۳ nm [۱۰] ساخته شده و یک کریستال معدنی حدوداً ۵۰ نانومتری (کمتر از ۱۰۰ نانومتر [۸]) از مگنتیت^{۱۲} (Fe_3O_4) یا گریگیت^{۱۳} (Fe_7S_8) را در خود جای داده است. خصوصیات غیرمعمول این ترکیبات معدنی مغناطیسی و پتانسیل آن‌ها در مورد بهره‌برداری قرار گرفتن در زمینه‌های گوناگون، آن‌ها را به کانون بیشتر مطالعات انجام شده روی مگنتوزوم‌ها مبدل ساخته است [۵]. باکتری‌های مگنتوتاکتیک، اثرهای سمی شناخته شده ندارند و یک گروه غیرهمگن از پروکاریوت‌ها هستند که ریخت‌های سلولی متفاوت کروی، میله‌ای، مارپیچی و در مواردی چند سلولی نشان می‌دهند. این میکروارگانیسم‌ها علی‌رغم تنوع فراوان چندین خصلت عمومی مشترک هستند:

- همه انواع کشف شده آن‌ها، گرم منفی هستند،
 - متحرک‌اند و عموماً با تاژک حرکت می‌کنند،
 - همگی به تراکم اکسیژن اتمسفری، پاسخ رشدی منفی بروز می‌دهند،
 - همگی در محیط کشت، متابولیسم تنفسی دارند،
 - همگی دارای مگنتوزوم هستند [۱۰].



شکل ۱: تصویر میکروسکوپ الکترونی گذاره از یک نمونه سلول مگنتوتاکتیک [۱۰]

چندین ترکیب معدنی دیگر از سولفید آهن نیز در مگنتوزوم‌ها شناسایی شده‌اند، از جمله FeS چهاروجهی و FeS مکعبی که به‌نظر می‌رسد شکل ابتدایی Fe_3S_4 باشند. یک گونه نیز شناسایی شده که اکسید و سولفید آهن را باهم تولید می‌کند اما تاکنون خالص‌سازی و

در میان باکتری‌های مگنتوتاکتیک، کریستال‌های مختلف مگنتیت با اندازه‌ها و مورفولوژی‌های باریک مختص به گونه، شامل مکعب-هشت وجهی، طولی شش وجهی و گلوله‌ای شکل، تحت شرایط گوناگون محیطی مشاهده شده است

رشد آن در محیط کشت خالص عملیاتی نشده است. به‌نظر می‌رسد ترکیب معدنی مگنتوزوم تحت کنترل شدید شیمیایی است، زیرا حتی زمانی که سولفید هیدروژن در محیط رشد حضور دارد، سلول‌های باکتری‌های مگنتوتاکتیک متعددی به ساخت Fe_3O_4 و نه Fe_3S_4 ادامه می‌دهند. ضمناً، کریستال‌های Fe_3O_4 در مگنتوزوم‌ها از خلوص بالایی برخوردارند و گزارش‌های ناخالصی از فلزاتی غیر از آهن درون این کریستال‌ها نادر است. به‌علاوه، هیچ پروتئینی در کریستال‌های مگنتوزوم Fe_3O_4 یافت نمی‌شود [۱۰].

باتوجه به اینکه نشانه‌ای از باکتری‌های مگنتوتاکتیک با مگنتوزوم‌های Fe_3S_4 در محیط کشت خالص به‌دست نیامده است،

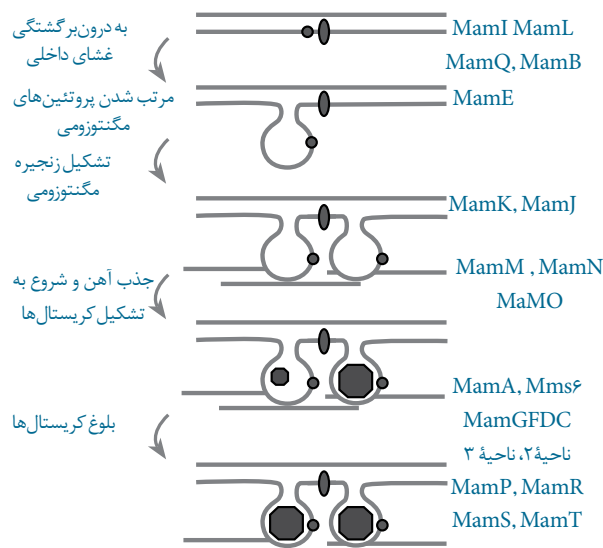
دربارهٔ چگونگی و شرایط تشکیل Fe_3S_4 اطلاعات بسیار اندکی در دست داریم. با وجود این، اعمال موقعیت‌های سولفیدی بی‌هوازی معمولاً زمینه‌ساز تشکیل آن‌هاست. احتمالاً معدنی‌سازی Fe_3S_4 توسط باکتری‌های مگنتوتاکتیک تنها در غیاب اکسیژن روی می‌دهد. زیست معدنی‌سازی Fe_3S_4 متأثر از فاکتورهای متعددی است که مهم‌ترین آن‌ها، وجود تراکم اکسیژن و حضور اکسیدهای نیتروژن است [۱۰].

در میان باکتری‌های مگنتوتاکتیک، کریستال‌های مختلف مگنتیت با اندازه‌ها و مورفولوژی‌های باریک مختص به گونه، شامل مکعب-هشت وجهی^۴، طولی شش وجهی^۵ و گلوله‌ای شکل^۶، تحت شرایط گوناگون محیطی مشاهده شده است. این یافته، منتج به این تصور شده است که باکتری‌های مگنتوتاکتیک چرخهٔ معینی از فرایندهای زیست معدنی‌سازی مگنتیت را با به‌کارگیری مولکول‌های تولیدشده زیستی به خدمت می‌گیرند [۸].

دانش ما در ارتباط با الگوهای باکتری‌های مگنتوتاکتیک به‌وسیلهٔ آن‌ها این کریستال‌های معدنی را تولید می‌کنند، ناچیز است. با وجود این، پیشرفت‌های خوبی در خالص‌سازی و تراکم این باکتری‌ها و نیز درک ما از سیمای اختصاصی مگنتوزوم‌ها و چگونگی عملکرد آن‌ها در سلول‌ها حاصل شده است. حساسیت بخش اعظم باکتری‌ها به تراکم پایین اکسیژن و این حقیقت که عمدهٔ باکتری‌های مگنتوتاکتیک در تراکم بسیار پایین اکسیژن مگنتوزوم تولید می‌کنند، احتمالاً عامل‌های محدودکنندهٔ جست‌وجو در این زمینه برای سال‌های طولانی بوده‌اند [۱۰].

این امکان وجود دارد که برخی از آرکی‌ها، یا باکتری‌های غیرمتحرک نیز مگنتوزوم تولید کنند. اگر چه که موردی دال بر این موضوع، تاکنون گزارش نشده است [۱۰]. مگنتوزوم‌ها همچنین در جلبک‌های مگنتوتاکتیک نیز یافت می‌شوند که در آن‌ها هر سلول شامل چندین هزار کریستال است [۱۱]. مطالعات فیزیولوژیک روی انواع گوناگون باکتری‌های مگنتوتاکتیک نشان می‌دهد که آن‌ها در چرخهٔ شیمیایی چندین عنصر مهم در طبیعت، از جمله آهن، نیتروژن، سولفور و کربن، مشارکت دارند [۱۰].

از منظر زیست‌شناسی سلولی، غشای مگنتوزوم، که ممکن است کلید درک ویژگی‌های بنیادی اندامک‌های پروکاریوتی باشد، مورد بی‌توجهی واقع شده است. کارهای میکروسکوپی الکترونی دقیق و مطالعات بیوشیمیایی نشان داده‌اند که غشای مگنتوزوم خصوصیات سیتولوژیک و شیمیایی یک غشای دو لایهٔ لیپیدی را داراست. به‌علاوه، بررسی‌های گوناگون پروتئومیک نشان داده‌اند که مگنتوزوم‌ها ترکیبی خاص از پروتئین‌های محلول و دمین‌های گذرنده از غشا را دارند که دال بر وجود یک سیستم انتقال پروتئین اختصاصی است. غشای مگنتوزوم و گروه‌های پروتئینی آن [۵]، شامل یک مجموعهٔ اختصاصی از بیش از ۲۰ نوع پروتئین [۷]، پیش از تشکیل کریستال وجود دارد و به‌عنوان یک جایگاه زیست معدنی‌سازی به‌کار گرفته می‌شود.



شکل ۳: چگونگی تشکیل مگنتوزوم در
Magnetospirillum 1-magneticum AMB [۴]

است [۷] (شکل ۳).

جالب توجه‌تر، این یافته است که در *Magnetospirillum 1-magneticum AMB*، مگنتوزوم‌ها درون وزیکول‌ها قرار ندارند و در عوض در امتداد غشای سلولی داخلی مستقرند. (شکل B ۲) با وجود آنکه چنین سازماندهی در ابتدا یک معما به نظر می‌رسد، درک از ماهیت عملکردی مگنتوزوم و زیست معدنی‌سازی مگنتیت را دستخوش تغییر می‌کند. این فرضیه مطرح شده که چه بسا لازمه زیست معدنی‌سازی مگنتیت، تشکیل ترکیباتی مانند فری هیدریت^{۱۹} در فضای پری پلاسمیک باشد. در این راستا، منفذ کوچک بین لومن مگنتوزوم و پری پلاسم، مسیر ساده انتقال این مواد معدنی اولیه را فراهم می‌کند. تصاویر توموگرافی کرایو - الکترون از *Magnetospirillum gryphiswaldense MSR-۱*^{۲۰} یک موجود زنده دارای ارتباط نزدیک با *Magnetospirillum magneticum AMB-۱* وجود هیچ نوع ارتباطی را بین غشای مگنتوزوم و غشای سلولی داخلی آشکار نداشت. با وجود این، در این موجود مگنتوزوم‌ها در کنار هم و مقابل غشای سلول یافت می‌شوند [۵].

باکتری‌های مگنتوتاکتیک، موجودات زنده حساس با روند رشدی آهسته هستند اما از مزیت‌های گوناگونی به‌عنوان یک موجود مدل در بررسی مولکولی تشکیل اندامک‌ها در پروکاریوت‌ها برخوردارند. طی چند سال گذشته، ژنوم‌های چندین باکتری مگنتوتاکتیک تعیین توالی شده‌اند. این موضوع که مگنتوزوم‌ها به آسانی از عصاره سلولی قابل خالص‌سازی هستند و مهم‌تر اینکه برای حیات سلول در شرایط رشدی آزمایشگاه ضروری نیستند، دریچه‌ای به‌روزی استفاده از ژنتیک، به‌عنوان یک ابزار در تشکیل مگنتوزوم، گشوده است. ترکیبی از این رویکردها، به معرفی فهرست بالا بلندی از ژن‌ها منجر شده است که به‌نظر می‌رسد تضمین‌کننده تشکیل و عملکرد مگنتوزوم‌ها هستند. با

این خود تأییدی بر وجود یک اندامک مستقل است. سازمان‌دهی مگنتوزوم‌ها در یک یا چندین رشته نشان می‌دهد که می‌بایست مکانیسمی به‌منظور تعیین موقعیت مناسب و توزیع این ساختارها در سلول وجود داشته باشد. نمای دقیقی که اخیراً از مگنتوزوم‌ها به‌دست آمده، مرهون استفاده از توموگرافی کرایو- الکترون^{۱۷} است. ترکیبی از آماده‌سازی سریع، حداقل آسیب به ویژگی‌های سلولی و حصول یک بزرگ‌نمایی نانومتری از مگنتوزوم‌ها، ویژگی‌هایی هستند که در حداقل ۳۰ سال گذشته که مطالعه روی باکتری‌های مگنتوتاکتیک در جریان بوده است، قابل مشاهده نبوده‌اند [۵].



شکل ۲: مگنتوزوم به‌وسیله انواع مختلف میکروسکوپی الکترونی قابل رؤیت است. توموگرافی کرایو- الکترون تصریح می‌کند که: (A) کریستال‌های مگنتیت به‌صورت یک رشته در درون سلول دیده می‌شوند. (B) غشای مگنتوزوم مأخوذ از غشای سلولی داخلی است. (C) فیلامنت‌های اسکلت سلولی، رشته‌های مگنتوزوم را احاطه کرده‌اند [۵].

از منظر زیست‌شناسی سلولی، غشای مگنتوزوم، که ممکن است کلید درک ویژگی‌های بنیادی اندامک‌های پروکاریوتی باشد، مورد بی‌توجهی واقع شده است

سنتز مگنتوزوم، به‌تازگی به‌عنوان مدلی از تشکیل اندامک پروکاریوتی و زیست معدنی‌سازی مطرح شده است. به‌علاوه، مگنتوزوم‌ها ذرات آهن‌ربایی بیوژنتیکی را به‌طور خاص ارائه می‌کنند که آن‌ها را برای به‌کارگیری در طیف وسیعی از کاربردهای بیومدیکال و بیوتکنولوژیک جذاب ساخته است. با وجود آنکه جزئیات مکانیسم سنتز مگنتوزوم درک نشده است، مطالعات متعدد اخیر آشکار می‌کنند که تشکیل مگنتوزوم‌ها فرایندی است که به مراحل متعددی مشتمل بر جدا شدن غشای وزیکول‌های مگنتوزومی از غشای داخلی، انتقال یون‌ها و کریستاله شدن مگنتیت درون این وزیکول‌ها و جفت‌وجور شدن کریستال‌های بالغ به فرم یک رشته خطی در امتداد فیلامنت‌های ساختارهای اسکلت سلولی وابسته است. همچنین مشخص شده که هر یک از این مراحل، تحت کنترل دقیق ژنتیکی

کمال تعجب، بیشتر این ژن‌ها، در یک ناحیه ژنومی انبوه و ناپایدار مرتب شده‌اند که عناصر مرکزی آن در بین گونه‌های مختلف باکتری‌های مگنتوتاکیک حفاظت شده است. این ناحیه، جزیره مگنتوزوم^{۲۱} نام دارد و از سیمای قراردادی سایر جزایر ژنومی که در باکتری‌ها یافت می‌شود، برخوردار است. به عنوان نمونه، پیش‌بینی می‌شود در *Magnetospirillum magneticum* AMB-۱، این ناحیه شامل بیش از صد ژن باشد که چیزی نزدیک به ۲ درصد از محتوای ژنی جاندار را به خود اختصاص می‌دهد [۵]. به علت حفاظت‌شدگی عمومی این ناحیه در باکتری‌های مگنتوتاکیک، پیشنهاد شده که در مورد این جزیره ژنومی، انتقال افقی ژنتیکی روی داده است [۷]. آنچه که جزیره مگنتوزومی را در نظر زیست‌شناسان سلولی جالب توجه می‌سازد، این احتمال است که این ناحیه عملکردهای خاص مورد نیاز جهت تشکیل مگنتوزوم را تضمین می‌کند. مطالعات بیوشیمیایی و ژنتیک نشان داده‌اند که تعدادی از ژن‌های جزیره مگنتوزومی پروتئین‌هایی را کد می‌کنند که اندازه و مورفولوژی کریستال‌های مگنتیت متأثر از آن‌هاست. سایر عامل‌ها، از قبیل پروتئین *MamA*، در فعال‌سازی و با آماده کردن مگنتوزوم‌های از پیش تشکیل شده برای بیومینرالیزاسیون دارای عملکرد هستند و آن گونه که بعداً مشخص شد، یک ناحیه مرکزی از جزیره مگنتوزومی برای تشکیل غشای مگنتوزوم، انتقال پروتئین به این اندامک و مکان‌یابی ویژه آن در درون سلول ضروری است [۵].

در قلب جزیره مگنتوزومی، اپرون *mamABE* واقع شده است؛ یک خوشه ژنی که در گونه‌های مختلف باکتری‌های مگنتوتاکیک حفاظت شده است. یک آنالیز ژنتیک جامع از جزیره مگنتوزومی نشان داد که در غیاب اپرون *Magnetospirillum mamABE*

باکتری‌های مگنتوتاکیک، موجودات زنده حساس با روند رشدی آهسته هستند اما از مزیت‌های گوناگونی به عنوان یک موجود مدل در بررسی مولکولی تشکیل اندامک‌ها در پروکاریوت‌ها برخوردارند

magneticum AMB-1 غیرمگنتیک است و حتی در تشکیل غشاهای مگنتوزومی خالی نیز ناموفق خواهد بود. آنالیز جهش‌های مشخص از هر یک از ۱۸ ژن این خوشه ژنی، گستره‌ای از فنوتیپ‌های جهش یافته با نقایصی در مراحل مختلف تشکیل مگنتوزوم را آشکار می‌کند. جالب این است که به نظر می‌رسد چهار ژن *mamL*، *mamI* و *mamQ* و *mamB* برای تشکیل غشای مگنتوزوم ضروری‌اند. *mamQ* و *mamB* با خانواده بزرگی از پروتئین‌های غشایی همولوژی دارند در حالی که *MamL* و *MamI* مختص باکتری‌های مگنتوتاکیک هستند. دو پروتئین اخیر، پلی‌پپتیدهای کوچک ۷۰ آمینواسیدی با دو دمین‌گذرنده از غشا هستند. *MamL*، دارای یک دم سیئوپلاسمی غنی از آمینواسید دارای بار مثبت است. در غیاب *MamE* به عنوان

یک پروتئاز حقیقی، غشاهای مگنتوزومی خالی تشکیل می‌شوند، اگرچه که برخی از پروتئین‌ها در مکان خود استقرار نیافته‌اند [۵]. یکی از ژن‌های مرکزی اپرون *mamABE*، *mamK* همولوگ یک خانواده از پروتئین‌های شبه اکتین باکتریایی است که در طی یک دهه گذشته کشف شده‌اند. با حذف *mamK* در *Magnetospirillum magneticum* AMB-۱، جهش یافته‌های حاصل به لحاظ تشکیل غشای مگنتوزوم و یا زیست معدنی‌سازی مگنتیت، معیوب نیستند اما در عوض، مگنتوزوم‌ها به صورت رشته سازمان‌دهی نمی‌شوند. بررسی‌های تصاویر توموگرافی کرایو-الکترن مربوط به *Magnetospirillum magneticum* AMB-۱ و *MSR-۱* *Magnetospirillum gryphiswaldense* مشخص کرده که زنجیره مگنتوزوم به وسیله شبکه‌ای از فیلامنت‌های اسکلت سلولی مشابه فیلامنت‌های شبه اکتینی باکتریایی احاطه شده است (شکل ۲ C). جالب توجه این است که با حذف *mamK*، این رشته‌ها با طول زیاد وجود نخواهند داشت. این نتایج نشان می‌دهند که این پروتئین‌های شبه اکتینی پایه‌گذار اجزای ساختاری اسکلت سلولی وابسته به مگنتوزوم هستند. همچنین، به نظر می‌رسد که *MamJ*، یک پروتئین به شدت اسیدی تولیدشده توسط ژنی که مستقیماً در فرادست *mamK* قرار دارد، در سازماندهی زنجیره‌های مگنتوزوم نقش تعیین‌کننده ایفا می‌کند. با حذف *MamJ* در *MSR-۱* *Magnetospirillum gryphiswaldense*، زنجیره‌های مگنتوزوم به درون یک گوی درون سلولی تخلیه می‌شوند. در این موتان، ساختارهای مشابه اسکلت سلولی وابسته به مگنتوزوم، همچنان توسط توموگرافی کرایو-الکترن قابل مشاهده‌اند اما آن اندازه طویل نیستند که توسط مگنتوزوم‌ها همراهی شوند. جمع‌بندی این نتایج نشان می‌دهد که مشابه سلول‌های یوکاریوتی، سلول‌های پروکاریوتی نیز می‌توانند از مزیت عناصر اسکلت سلولی به منظور تعیین موقعیت و تنظیم قسمت‌های زیرمجموعه سلولی بهره ببرند [۵].

در *MSR-۱* *Magnetospirillum gryphiswaldense*، همه ژن‌های شناخته شده مگنتوزوم از چهار خوشه ژنی مشخص به نام اپرون‌های *mms6*^{۲۲}، *mamGFDC*^{۲۳}، *mamAB* و *mamXY*^{۲۴} منشأ می‌گیرند. علائم آزمایشگاهی اولیه در ارتباط با اختصاصات عملکردی آن‌ها در تشکیل مگنتوزوم از خالص‌سازی یک جهش یافته غیرمگنتیک که یک ناحیه به طول ۴۰ کیلو باز از جزیره مگنتوزومی را به علت یک جهش ذاتی که اپرون‌های *mamGFDC*، *mamAB* و *mms6* را از دست داده، حاصل شده است. حذف هذفمند کل اپرون *mamAB* نشان می‌دهد که پروتئین‌های کوچک *mamGFDC* که بیش از ۳۵ درصد از کل پروتئین‌های مرتبط با مگنتوزوم را تشکیل می‌دهند، غیرضروری‌اند، اما در جنبه کنترل اندازه، سلول‌های موتان کریستال‌های مگنتیت کوچک‌تر و غیرمعمول تشکیل می‌دهند. در یک مطالعه جدید، آنالیز حذفی جزیره مگنتوزومی در *Magnetospirillum magneticum* AMB-۱، سه ناحیه را که جهت تشکیل کریستال مگنتیت حیاتی‌اند، آشکار می‌کند. از یک طرف، حذف نواحی ویژه شامل بخش‌هایی از اپرون‌های *mamGFDC* و *mms6* به یک

2. polyhydroxy butyrate granules
3. carboxysomes
4. gas vacuoles
5. magnetosomes
6. photosynthetic membranes
7. planctomycetes
8. Magnetotactic
9. geomagnetic
10. MB(MTB)
11. MM
12. magnetite
13. greigite
14. cubo-octahedra
15. elongated hexahedra
16. bullet shape

۱۷. cryo-electron tomography (CET): تکنیکی که رؤیت نمونه‌ها را در سه بعد با تفکیک نانومتری امکان‌پذیر می‌کند. این روش قادر است مورفولوژی سلول، شکل ساختار غشاء، تصویر سازماندهی درون مولکولی و پروتئین‌های بزرگ را آشکار نماید. توموگرافی کرایو- الکترون، یک تکنیک بدیع در جست‌وجوی ساختاری بیولوژیک است [۶].

18. Lineage : Bacteria , Proteobacteria , Alphaproteobacteria , Rhodospirillales , Rhodospirillaceae , Magnetospirillum [2]
19. ferrihydrite
20. Lineage : Bacteria , Proteobacteria , Alphaproteobacteria , Rhodospirillales , Rhodospirillaceae , Magnetospirillum [2]
21. magnetosome island (MAI)
۲۲. پروتئین mms۶ دارای یک موتیف هیدروفوبیک با تکرارهای لوسین - گلیسین در N - ترمینال و یک ناحیه هیدروفوبیک در C- ترمینال است و گمان بر این است که این پروتئین با کریستال مگنتیت و یون‌های آهن میان کنش دارد [۸].
۲۳. شامل ژن‌های *mms۷/mamD* و *mms۱۲/mamC* و دارای نقش در کنترل اندازه کریستال مگنتیت [۸].
۲۴. یک اپرون چند ژنی با یک راه انداز که در شرایط محدودیت منابع آهن، بیان کاهشی دارد [۹].

منابع

1. www.wikipedia.org
2. www.uniprot.org
3. www.pans.org
4. www. 2011.igem.org
5. Murat D, Byrne M, Komeili A. Cell Biology of Prokaryotic Organelles. 2010 Oct
6. Koning RI, Koster AJ. Cellular nanoimaging by cryo electron tomography. Methods Mol Biol. 2013
7. Anna Lohße, Susanne Ullrich, Emanuel Katzmann, Sarah Borg, et al. Functional Analysis of the Magnetosome Island in Magnetospirillum gryphiswaldense: The mamAB Operon Is Sufficient for Magnetite Biomineralization. Oct 2011
8. Tanaka M, Mazuyama E, Arakaki A, Matsunaga T. MMS6 Protein Regulates Crystal Morphology during Nano-sized Magnetite Biomineralization in Vivo. 2011 Feb
9. Yao Ding, Jiangning Liu, Wei Jiang, Jiesheng Tian, Ying Li, Jilun Li. Transcriptional organization and regulation of the Magnetospirillum gryphiswaldense MSR-1 mamXY gene Cluster. jun 2008
10. Dennis A. BazyLinski¹ & Richard B. Franke. Magnetosome formation in prokaryotes. March 2004

نقص جدی در اندازه و مورفولوژی کریستال‌ها منتج می‌شود و از طرف دیگر از دست دادن اپرون *mamAB* سلول‌های کاملاً عاری از کریستال‌های مگنتیت را نتیجه می‌دهد. این یافته مؤید آن است که تنها اپرون *mamAB* ممکن است شامل ژن‌های کاملاً مورد نیاز باشد.

این فرضیه مطرح شده که چه بسا لازمه زیست معدنی‌سازی مگنتیت، تشکیل ترکیباتی مانند فری‌هیدریت در فضای پری پلاسمیک باشد

با این وصف، این موضوع ناشناخته مانده است که آیا این ناحیه جهت زیست معدنی‌سازی مگنتوزوم در غیاب سایر ژن‌های مگنتوزومی کافی است یا خیر.

علی‌رغم وجود تشابهات مورفولوژیک بین گونه‌های *AMB-1* و *M. gryphiswaldense MSR-1*، مطالعات پیشین نشان می‌دهد که عملکرد ژن‌های اورتولوگ، با توجه به زمینه ژنتیک متفاوت آن‌ها و اینکه حدود ۵۰ درصد از کل ژنوم در این دو گونه مشترک است، ممکن است تا حدودی در این ارگانیسم‌ها متفاوت باشد [۷]. ضمناً، با وجود آنکه ارتباط پروتئین‌های فراوانی با کریستاله شدن مگنتیت مطرح شده است، جزئیات آنالیز عملکرد این پروتئین‌ها در روند کریستاله شدن در محیط زنده هنوز عملیاتی نشده است [۸].

همان گونه که مشاهده می‌شود، پیشرفت در مطالعه مگنتوزوم‌ها در طی چند سال اخیر سریع بوده است و یافته‌های باورنکردنی از

مطالعات بیوشیمیایی و ژنتیک نشان داده‌اند که تعدادی از ژن‌های جزیره مگنتوزومی پروتئین‌هایی را کد می‌کنند که اندازه و مورفولوژی کریستال‌های مگنتیت متأثر از آن‌هاست

خصوصیات ساختاری این اندامک به کمک مطالعات مولکولی حاصل شده است. هم‌اکنون، کارهای بیشتری برای انجام دادن باقی مانده است. با وجود کشف و آنالیز ژنتیک جزیره مگنتوزوم، مکانیسم ویژه‌ای که تولید زیستی غشا و انتقال پروتئین‌ها به آن را کنترل می‌کند، همچنان تعریف نشده باقی مانده است. ضمناً، علی‌رغم اینکه کشف سیستم *MamK/MamJ* در تشکیل زنجیره مگنتوزومی، یک پیشرفت آشکار در این زمینه است، مکانیسم عملکرد آن مرموز باقی مانده است [۵].

پی‌نوشت‌ها

1. lipid bodies