

## ● مقاله مروری

## تغییرات فیزیولوژیک و بیوشیمیایی در بدن فضانوردان حین سفرهای فضایی

احمد قاسمی<sup>۱</sup>، \*مجتبی پنجه پور<sup>۲</sup>

### چکیده

تهدیداتی شامل تغییرات آب و هوایی و سقوط شهاب سنگ، جامعه انسانی بر روی کره زمین را تهدید می‌کند. دانشمندان معتقدند به منظور حفظ تمدن انسانی، بشر باید در جستجوی مناطق دیگری از منظومه شمسی جهت ادامه حیات باشد. در طی دهه‌های اخیر سفرهای فضایی متعددی به منظور کسب اطلاعات از سایر قسمت‌های منظومه شمسی انجام شده است. حضور فضانوردان در این مناطق با چالش‌های متعددی مواجه بوده است. در طی سفرهای فضایی کوتاه یا بلند مدت بدن فضانوردان تغییرات فیزیولوژیک و بیوشیمیایی قابل توجهی را متحمل می‌شود. این تغییرات که اغلب به منظور سازگاری سیستم‌ها و بافت‌های بدن فضانوردان صورت می‌پذیرد تحت تأثیر عواملی مانند مایکروگراویتی محیط، استرس، تغذیه، تغییر در سیکل خواب، تغییر در دما، فشار و رطوبت هستند. تغییرات در توده‌های بدنی، بالانس انرژی، وضعیت آب و الکترولیت، متابولیسم کلسیم و استخوان و تغییرات اندوکرینی از مهمترین تغییرات در طی سفر فضایی است. هدف از این مقاله مروری معرفی علل و مکانیسم‌های بیوشیمیایی و فیزیولوژیک احتمالی و اقدامات متقابل به منظور جلوگیری از خطر احتمالی این تغییرات بر سلامت فضانوردان است.

**کلمات کلیدی:** انطباق فیزیولوژیک، اقدامات متقابل در برابر بی‌وزنی، فضانوردی،

### گراویتی

(سال نوزدهم، شماره دوم، تابستان ۱۳۹۶، مسلسل ۵۹)

تاریخ پذیرش: ۹۵/۱۲/۲۹

فصلنامه علمی پژوهشی ابن سینا / اداره بهداشت، امداد و درمان نهجا

تاریخ دریافت: ۹۵/۶/۲۹

۱. کارشناس ارشد، اصفهان، ایران، دانشگاه علوم پزشکی

اصفهان، دانشکده داروسازی

۲. دانشیار، اصفهان، ایران، دانشگاه علوم پزشکی اصفهان،

دانشکده داروسازی (\*مؤلف مسئول)

panjehpour@pharm.mui.ac.ir

## مقدمه

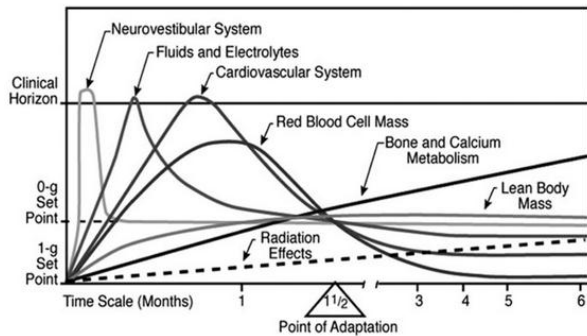
انسان در خارج از جو زمین با آنها روبرو می‌گردد. گراویتی پدیده‌ای است که از بر هم کنش دو جسم ایجاد می‌گردد و هرچه این دو جسم از یکدیگر فاصله بیشتری داشته باشند این بر هم کنش ضعیف‌تر است. نیروی گراویتی در سطح زمین نتیجه بر هم کنش زمین با بدن انسان است و شتاب این نیرو در سطح زمین برابر با  $9/8$  متر بر مجذور ثانیه است. به دلیل اینکه بدن انسان کوچکتر از سطح زمین است پس این بدن انسان است که به طرف زمین کشیده می‌شود. از حاصلضرب این نیرو و جرم بدن انسان وزن انسان به دست می‌آید. زمانی که فضانوردان به سمت فضا حرکت می‌نمایند این نیرو همچنان بر بدن فضانوردان اعمال می‌گردد اما هر چه فاصله فضاپیما تا سطح زمین بیشتر می‌شود این نیرو ضعیف‌تر می‌گردد. از طرفی سرعتی که فضاپیما کسب می‌نماید تا به فضا برسد نیز بر خلاف گراویتی عمل کرده و آن را تقریباً خنثی می‌نماید بدین ترتیب گراویتی در فضا کاهش می‌یابد و به اصطلاح به آن مایکروگراویتی<sup>۱</sup> گفته می‌شود و فضانورد بی وزن می‌شود. بافت‌ها و اندام‌های مختلف بدن انسان برای فعالیت در شرایط گراویتی برابر با  $9/8$  متر بر مجذور ثانیه سازگاری یافته است. سلول‌های بدن انسان در مقابل این تغییرات سازگاری‌های جدیدی را کسب می‌نمایند و به منظور کسب سازگاری‌های جدید تغییرات فیزیولوژیک و بیوشیمیایی در اندام‌ها و بافت‌های مختلف اجتناب‌ناپذیر است (شکل ۱) [۴-۷].

تغییر در توده‌های بدنی<sup>۲</sup> به خصوص توده‌های ماهیچه‌ای و بالانس انرژی [۹]، تغییرات در پخش آب و الکترولیت در سطح بدن [۱۰]، متابولیسم کلسیم و استخوان [۱۱]، سیستم قلب و عروق و سیستم عصبی، مهمترین تغییراتی است که به منظور سازگاری در شرایط خارج از جو زمین در بدن انجام می‌گردد. طول مدت ایجاد سازگاری‌های جدید از چند روز تا چند ماه در

در طول حیات بر روی کره زمین عوامل گوناگونی مانند بیماری‌ها، جنگ‌ها، بلایای طبیعی زندگی انسان‌ها را به مخاطره انداخته است. امروزه با پیشرفت تکنولوژی و صنعتی شدن زندگی انسان این خطرات جدی‌تر شده است. تغییرات آب و هوایی شامل گرم شدن کره زمین، تغییر فصول و آب شدن یخچال‌های قطبی به همراه تشدید آلودگی کره زمین که پاره شدن لایه اوزون را به همراه داشته است و همچنین خطر برخورد سایر سیارات به کره زمین و سقوط شهاب سنگ‌ها از مهمترین خطراتی است که زندگی بشریت بر روی کره زمین را مورد تهدید قرار داده است و شاید بتواند زمین را به محلی غیرقابل سکونت برای انسان تبدیل کند. جهان بسیار وسیع است و در مدار صدها هزار ستاره در کهکشان‌های مختلف، میلیون‌ها سیاره وجود دارند که برخی از آنها ممکن است از قابلیت احتمالی زیست‌پذیری برخوردار باشند، اما یافتن جهان دیگری برای سکونت و نجات نسل بشر در ابتدا به کسب اطلاعات و شناخت کافی از آنجا نیاز دارد. حتی بدون نیاز به ترک اجباری زمین کنجکاوی بشر به دانستن بیشتر ضرورت سفرهای فضایی را نیز توجیه می‌کند [۳-۱]. توسعه تکنولوژی خط مقدم تلاش‌های بشر برای دستیابی و حفظ زندگی در نقاط ناشناخته منظومه شمسی مانند اعماق دریا و سیارات دیگر بوده است. در رابطه با سفرهای فضایی تلاش‌های بشر در ابتدا به توسعه فن‌آوری برای ساخت موشک، تأمین نیروی محرکه لازم و سیستم‌های مهندسی که قادر باشد انسان را به فضای خارج جو زمین منتقل نماید معطوف بود. دستیابی به این فن‌آوری‌های مهندسی و رسیدن انسان به خارج از جو زمین اطلاعات وسیعی در رابطه با تغییرات فیزیولوژیک و بیوشیمیایی سلول‌های بدن انسان تحت شرایط متفاوت با جو زمین را فراهم نمود. مایکروگراویتی، حضور اشعه‌های یونیزان و غیریونیزان خطرناک، تغییر در فشار، دما و رطوبت، وجود سطوح بالای از آلاینده‌ها و دی‌اکسیدکربن و استرس‌های فیزیولوژیک و روحی-روانی از مهمترین تغییراتی است که ضمن حضور

1. Microgravity

2. Body mass



شکل ۲- مدت زمان لازم برای کسب سازگاری‌های جدید در سیستم‌های مختلف بدن فضاوردان [۱۲]

### گراویتی و اهمیت آن برای حیات

گراویتی نیرویی است که در امتداد خط واصل دو ذره به جرم‌های  $m_1$  و  $m_2$  که به فاصله  $r$  از هم فاصله دارند، به یکدیگر وارد می‌کند و مقدار آن از رابطه  $F = Gm_1m_2/r^2$  بدست می‌آید. مقدار  $G$  برابر با  $6.67 \times 10^{-11}$  و برای تمام زوج ذرات یکسان است و این ثابت جهانی با  $g$  که شتاب ناشی از جاذبه گرانشی زمین روی یک جسم است متفاوت است. این نیرو همیشه به صورت جاذبه است و بین دو ذره الکتریکی با بار مشابه نیز جاذبه ناشی از گراویتی وجود دارد اگر چه در این حالت نیرو آنقدر قوی نیست که بتواند بر نیروی دافعه الکتریکی غلبه نماید. بر اساس فرمول بالا گراویتی با جرم مواد ارتباط مستقیم دارد به طوری که هر چه جرم ماده بیشتر باشد توسط نیروی جاذبه بیشتر کشیده می‌شود [۱۳، ۱۴]. افتادن اجسام بر اثر گراویتی در میان همه اجسام کره زمین و همه ذرات جسم مورد نظر اتفاق می‌افتد. متراکم شدن مواد پس از انفجار بزرگ، تشکیل کهکشان‌ها، حضور و تجمع گازهای مختلف در کهکشان‌ها برای تشکیل ستارگان همگی ناشی از گراویتی است. این نیرو باعث چرخش ماه به دور زمین، چرخش زمین به دور خورشید و چرخش خورشید به دور مرکز کهکشان راه شیری می‌شود و به حرکت مداری آنها نظم می‌دهد. اگر چه با توجه به اینکه جرم کره زمین ثابت است نیروی جاذبه بر روی آن تغییر نمی‌کند اما فرض کنیم نیروی جاذبه برای چند ثانیه حذف گردد، حال چه اتفاقی می‌افتاد؟ در صورت حذف گراویتی

### تغییر در نیروهای وارد شده به بدن انسان

تغییر در عوامل فیزیکی: کاهش در وزن، فشار مایعات، نیروی همرفت، سدمان (رسوب)



شکل ۱- سازگاری‌های جدید در اثر مواجهه فضاوردان با شرایط فیزیکی جدید و تغییرات فیزیولوژیک بر بدن [۸]

سیستم‌های مختلف بدن متفاوت است. مطالعات نشان داده‌اند در حالی که سیستم عصبی بدن سریع‌ترین سازگاری به شرایط مایکروگراویتی را کسب می‌نماید توده ماهیچه نیاز به چند ماه برای کسب سازگاری‌های جدید دارد [۱۲]. (شکل ۲) بر این اساس با توجه به پیشرفت‌های بشریت در علوم زیستی و پزشکی به منظور مقابله با این تغییرات، که ممکن است برای فضاوردان مرگ‌آور باشد اقدامات متقابلی<sup>۱</sup> قبل، در حین و پس از بازگشت از سفر فضایی توصیه می‌گردد. این اقدامات سلامت فضاوردان به منظور حضور طولانی‌تر برای انجام مأموریت‌های پیچیده‌تر را تضمین می‌نماید [۴، ۶]. در این مقاله مروری مهمترین تغییرات فیزیولوژیک و بیوشیمیایی ضمن حضور در شرایط خارج از جو زمین در طی سفرهای فضایی کوتاه مدت یا بلند مدت به همراه مکانیسم‌های پیشنهادی طی مطالعات مختلف مرور شده است و اقدامات متقابل ممکن برای مقابله با این تغییرات برای حفظ سلامت فضاوردان ذکر گردیده است.

#### 1. Countermeasure

همین اساس تغییرات سیستم‌های اسکلتی-عضلانی در آنها ایجاد شد به طوری که این تغییرات، بدن پرندگان را به صورتی تغییر داد تا با کمترین نیرو بتواند بر خلاف جاذبه حرکت نمایند. با افزایش اندازه موجودات خشکی‌زی، نیاز به سیستم‌های محافظتی بر خلاف نیروی جاذبه افزایش یافت. این سیستم‌های محافظتی بر خلاف جاذبه، در خزندگان که وضعیت قرارگیری آنها افقی است، ساده‌تر بود ولی در رابطه با موجوداتی که وضعیت قرارگیری آنها افقی-عمودی بود سیستم‌های محافظتی پیچیده‌تری برای حفظ تعادل، حرکت مایعات و حرکت کردن برخلاف جاذبه مورد نیاز بود. بنابراین در طی تکامل موجودات از دریا تا خشکی گراویتی به عنوان یک فاکتور تعیین کننده، تغییرات عمده ساختاری در سیستم‌های زنده را رقم زده است که این تغییرات ساختاری باعث گسترش گونه‌های مختلف در سطح زمین شده است [۱۳، ۱۵، ۱۷]. بنابراین با وجود پیشرفت بشر از نظر تکنولوژی، تحمل عدم وجود گراویتی به مدت چند ثانیه غیرممکن است. تا قبل از شروع مطالعات فضایی در اکتبر ۱۹۵۷ درک بشر از اثر کاهش این نیروی فیزیکی بر حیات بر روی کره زمین ناچیز بود. با کاهش گراویتی در سفینه‌های فضایی و شروع سفرهای فضایی نه تنها درک انسان نسبت به گراویتی افزایش یافته است بلکه درک اثر عمیق این نیروی فیزیکی بر تکامل گونه‌ها بر روی زمین و تشکیل اکولوژی‌های اطراف آنها بیشتر شده است. سفرهای فضایی می‌تواند به فهم بهتر چگونگی تشکیل حیات بر روی کره خاکی کمک نماید [۱۳، ۱۴].

### تاریخچه سفرهای فضایی

آغاز سفرهای فضایی به چهار دهه اخیر باز می‌گردد، جایی که در اکتبر سال ۱۹۵۷ شوروی سابق اولین ماهواره فضایی خود بنام اسپوت نیک<sup>۱</sup> شماره یک را روانه فضا نمود و چهار سال بعد در دوازدهم آوریل سال ۱۹۶۱ فضانورد شوروی سابق

اجسام بر روی سطح زمین سنگینی و وزن نخواهند داشت و از زمین به سمت فضا پرتاب می‌شوند. بدون جاذبه اتمسفر، که سلول‌های زنده را در برابر تشعشعات مضر کیهانی محافظت می‌کند حذف می‌شد. تمامی گازهای حیاتی برای بقاء موجودات زنده از سطح زمین حذف می‌شد و یک حالت خلأ ایجاد می‌گردید، در این حالت انسان‌ها هیچ حسی نخواهند داشت. انسان‌ها همزمان با چرخش کره زمین هر روز با سرعت بسیار بالایی در حال چرخش هستند اما با توجه به ناچیز بودن جرم انسان در برابر جرم کره زمین این چرخش قابل درک نیست. وجود گراویتی باعث می‌شود که با وجود سرعت بالای چرخش کره زمین انسان‌ها و سایر اجسام موجود بر روی کره زمین به بیرون پرتاب نشوند. بنابراین با حذف جاذبه انسان و سایر اجسام موجود بر روی کره زمین با سرعت بسیار بالایی به بیرون پرتاب می‌شوند و لایه‌های مختلف کره زمین که به واسطه گراویتی در کنار هم قرار گرفته‌اند از هم می‌پاشند و کره زمین منفجر می‌گردد [۱۶-۱۳]. محققان معتقدند گراویتی بر روی تکامل موجودات از دریا تا خشکی نیز اثرگذار بوده است. بر اساس نظریه تکاملی، حیات از دریاها شروع شده است. اگرچه در موجودات آبی که به صورت شناور در آب‌ها حضور دارند گراویتی اثر چندانی بر آنها اعمال نمی‌کند اما فشار یکنواخت پیرامون بدن و برخی اندام‌های داخلی آنها مانند مثانه حین شنا حاکمی از تمایل بدن این موجودات به سمت تعادل با نیروی گراویتی است. هرچند مطالعات نشان داده است که برخی از این گونه‌های آبی از گراویتی به منظور جهت‌یابی نیز استفاده می‌کنند. با تکامل حیات به سمت خشکی موجودات زنده برای اولین بار اعمال شدن نیروی گراویتی بر بدن خود را احساس نمودند. بر اساس این درک گونه‌های خشکی‌زی که دیگر حالت شناور نداشتند، مجبور به تعیین جهت حرکت خود بر اساس جهت گراویتی شدند و مکانیسم‌های انطباقی جهت مقابله با این تغییر به منظور حرکت مایعات و ساختارهای بدنی برخلاف نیروی جاذبه را برگزیدند. پرندگان به منظور اوج‌گیری از سطح زمین نیاز به نیروی بسیار زیادی بر خلاف جاذبه بودند. بر

1. Sputnik

سال ۱۹۸۱ با هدف توسعه ماهواره‌های فضایی و تحقیقات در رابطه با علوم زیستی فعالیت خود را شروع کرد. بین سال‌های ۲۰۰۰-۱۹۸۶ ایستگاه فضایی میر<sup>۱۲</sup> ساخته شد و تحقیقات وسیع در زمینه علوم زیستی شروع شد. در یک پروژه فضایی مشترک بین شوروی و ایالات متحده به وسیله شاتل-میر در سال‌های ۱۹۹۸-۱۹۹۴ مطالعات وسیعی بر روی متابولیسم ماهیچه‌ها و استخوان‌ها صورت پذیرفت. از سال ۱۹۹۹ ایستگاه فضایی بین‌المللی<sup>۱۳</sup> تأسیس شد و این ایستگاه در ابتدا میزبان فضانوردانی از روسیه و آمریکا و سپس کانادا، ژاپن و اروپا بوده است. از سال ۲۰۰۱ پدیده توریسم فضایی راه اندازی شد و در سال ۲۰۰۳ کشور چین وارد باشگاه فضایی شد. سال ۲۰۰۴ اولین پرواز فضایی خصوصی روانه فضا شد و در سال ۲۰۱۱ سفینه فضایی شاتل که نقشی اساسی در خدمت‌رسانی به ایستگاه فضایی بین‌المللی داشت به کار خود پایان داد [۱۶، ۲۰-۱۸].

## تغییرات در بدن فضانوردان

### تغییر در توده بدنی

یکی از مهمترین یافته‌های فیزیولوژیک و بیوشیمیایی در رابطه با سفرهای فضایی از دست رفتن بخش قابل توجهی از توده ماهیچه‌ای بدن است که شامل وزن بدن منهای وزن توده چربی در یک فرد است. از دست رفتن توده بدنی که با از دست رفتن ترکیبات نیتروژن‌دار به خصوص پروتئین‌ها همراه است طی فضانوردی می‌تواند بر سلامت و عملکرد فضانوردان اثرگذار باشد. کاهش توده‌های بافتی، از دست رفتن مایعات بدن و آتروفی ماهیچه‌ای به دلیل بی‌حرکی از مهمترین علل از دست رفتن توده بدنی است [۹، ۲۱]. تصویرسازی تشدید مغناطیسی (MRI)<sup>۱۴</sup> از ماهیچه فضانوردان پس از یک دوره سفر فضایی ۸ روزه توسط فضاییمای شاتل حاکی از حذف

یوری گاگارین<sup>۱</sup> به مدت یک ساعت و چهل و هشت دقیقه با وسک هود<sup>۲</sup> شماره یک به دور زمین چرخید و به عنوان اولین انسانی که شرایط بی وزنی را تجربه کرده است نام خود را ثبت نمود. در پنجم می همان سال اولین پرواز فضایی ایالات متحده توسط آلن شیپارد<sup>۳</sup> و با فضاییمای مرکوری<sup>۴</sup> به مدت پانزده دقیقه به دور زمین انجام گرفت. چند ماه بعد در آگوست سال ۱۹۶۱ ژرمن تیتوی<sup>۵</sup> از شوروی سابق با وسک هود شماره دو به عنوان اولین انسان از جو زمین خارج و وارد فضا شد. پس از آن در بیستم فوریه سال ۱۹۶۲ ژوهان گلن<sup>۶</sup> به عنوان اولین آمریکایی وارد فضا شد و در آنجا مقداری مواد غذایی مصرف کرد و نام خود را به عنوان اولین انسانی که در فضا غذا مصرف کرده است ثبت نمود. اگرچه این اتفاق در حال حاضر کم اهمیت است اما برای آن دوران که هیچ اطلاعاتی از نحوه تغذیه و بلع مواد غذایی در شرایط بی وزنی وجود نداشت بسیار حائز اهمیت بوده است. بین سال‌های ۱۹۷۲-۱۹۶۶ سفرهایی با فضا پیماهای وسک هود، جمینی<sup>۷</sup> و آپولو<sup>۸</sup> انجام شد که این سفرها ضمن طولانی کردن مدت زمان حضور انسان در فضا شروع مطالعات در رابطه با علوم حیات در فضا را در پی داشته است. بین سال‌های ۱۹۸۵-۱۹۶۷ فضانوردان روسی توانستند به مدت ۱۸۸ روز در فضا حضور داشته و مطالعاتی را در زمینه حیات در فضا انجام دهند. اسکای لب<sup>۹</sup> اولین ایستگاه فضایی با هدف مطالعه علوم حیات در فضا در سال ۱۹۷۳ ساخته شد و اولین مطالعات متابولیکی بدن انسان در فضا انجام شد. در سال ۱۹۷۵ اولین پروژه فضایی مشترک بین شوروی و ایالات متحده به وسیله آپالو-سویز<sup>۱۰</sup> انجام شد. شاتل فضایی<sup>۱۱</sup> از

1. Yuri Gagarin
2. Voskhod
3. Alan Shepard
4. Mercury
5. German Titov
6. John Glenn
7. Gemini
8. Apollo
9. Skylab
10. Apollo-Soyuz
11. Space Shuttle

12. Mir

13. International Space Station

14. Magnetic Resonance Imaging

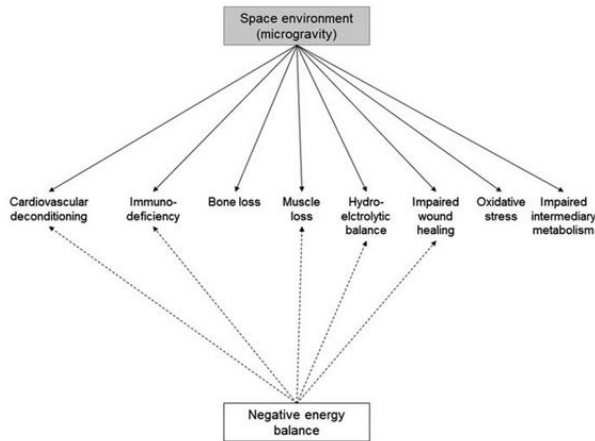
شده توسط استن<sup>۸</sup> و همکارانش بر روی کینتیک پروتئین‌ها در طول سفرهای فضایی بلند مدت (بیش از ۳ ماه) در فضانوردان ایستگاه فضایی میر، مشخص شده است سرعت سنتز پروتئین‌ها در ماهیچه‌های این فضانوردان در طی ۳ ماه اول ۴۵٪ کاهش نشان داده است. این در حالی است که در ششمین روز از فضانوردی کاهش در هر دو فرآیند شکسته شدن و سنتز پروتئین‌ها رخ داده است. با ادامه فضانوردی فرآیند شکسته شدن پروتئین‌ها به حالت طبیعی باز می‌گردد اما فرآیند سنتز پروتئین‌ها همچنان کاهش یافته است [۲۴]. در این مطالعه محققان نتیجه‌گیری کردند که حذف پروتئین‌های ماهیچه به دلیل افزایش تجزیه پروتئین‌های ماهیچه‌ای نیست بلکه ناتوانی بدن در حفظ سنتز پروتئین‌ها در ماهیچه علل اصلی کاهش توده ماهیچه‌ای است که این خود یک نوع سازگاری در پاسخ به مواجهه بدن فضانوردان با شرایط میکروگروایتی است زیرا بدن انسان تکامل خود را در شرایط جاذبه به دست آورده و تغییر این وضعیت سازگاری‌های جدیدی نیاز دارد [۶، ۲۴]. دریافت ناکافی مواد غذایی به دلیل مشغله فکری، برنامه‌های دقیق فضایی، تأخیر در درک گرسنگی و بی‌اشتهایی<sup>۹</sup> از مهمترین دلایل از دست رفتن توده‌های ماهیچه‌ای به شمار می‌آیند [۲۴]. در یک مطالعه بر روی فضانوردان فضایی شاتل مشخص شده است که فضانوردان در طی ۱۶-۸ روز ۳۰٪ غذای خود را کاهش داده‌اند. این در حالی است که مطالعات نشان داده است برخلاف تفاوت فعالیت فضانوردان بر روی سطح زمین نسبت به فضا میزان انرژی لازم برای انجام فعالیت در هر دو شرایط یکسان است [۲۵]. کمبود انرژی در طی فضانوردی به یک تعادل انرژی منفی منتهی می‌شود که به کاهش توده‌های ماهیچه‌ای منجر می‌گردد. مکانیسم انطباقی بدن فضانوردان به منظور تأمین انرژی لازم برای انجام فعالیت‌هایشان از یک طرف کاهش سرعت متابولیسم پایه

۱۰-۶٪ از توده‌های ماهیچه‌ای بوده است. بر اساس این تصاویر از دست رفتن توده‌های ماهیچه‌ای بیشتر در ماهیچه‌های دوقلو<sup>۱</sup> و نعلی<sup>۲</sup>، عضله چهار سر ران<sup>۳</sup> و عضلات وضعیتی<sup>۴</sup> رخ داده است که در حضور جاذبه زمین در سطح زمین بر خلاف جاذبه فعالیت داشته‌اند و با حذف جاذبه در خارج از جو زمین فعالیت قابل توجهی ندارند [۲۱]. سفرهای فضایی باعث تغییر در متابولیسم پروتئین در ماهیچه‌ها می‌گردد به طوری که در طول سفر فضایی بدن فضانوردان قادر به حفظ سرعت سنتز پروتئین‌ها نیست. پروتئین‌ها اعمال دینامیکی و ساختاری متنوعی را در بدن انسان انجام می‌دهند. این ماکرومولکول‌ها علاوه بر اینکه ماتریکسی برای استخوان و بافت همبند فراهم می‌نمایند، در تنظیم اعمالی مانند کاتالیز واکنش‌های شیمیایی در سلول‌ها، انتقال مواد، کنترل متابولیک و انقباض ماهیچه‌ها دخالت دارند [۲۲]. سنتز و تجزیه پروتئین‌های ماهیچه اسکلتی یک فرآیند دینامیک است که به بدن اجازه می‌دهد به طور محدود از ذخایر آمینواسیدی استفاده نماید. با استفاده از این فرآیند پویا و پیوسته بدن قادر است سیستم‌های آنزیمی را تنظیم، پروتئین‌های ناقص را حذف و فرآیندهای متابولیکی را تنظیم نماید. در افراد سالم در سطح زمین بین این فرآیندهای شکست و سنتز پروتئین‌های ماهیچه‌ای تعادل خالص مثبت<sup>۵</sup> برقرار است که به حفظ ماهیچه‌ها کمک می‌نماید. مطالعات در ماهیچه‌های فضانوردان نشان داده است که تعادل بین تجزیه و سنتز پروتئین‌های ماهیچه تعادل خالص منفی<sup>۶</sup> است که در نهایت به از دست رفتن ماهیچه فضانوردان منتهی می‌گردد. ایجاد این تعادل خالص منفی<sup>۷</sup> در متابولیسم پروتئین‌های ماهیچه‌ای را به افزایش تجزیه و کاهش سنتز پروتئین‌ها در ماهیچه‌ها نسبت داده‌اند [۶، ۲۲، ۲۳]. بر اساس مطالعات انجام

1. Gastrocnemius
2. Soleus
3. Quadriceps
4. Postural
5. Positive net balance
6. Negative net balance
7. Negative net balance

8. Stein

9. Anorexia



شکل ۳- تغییرات در بدن فضانوردان ضمن ایجاد تعادل انرژی منفی [۲۶]

پس از ۲-۳ روز از بین می‌رود. دو دسته فرضیه در رابطه با علت وقوع این سندروم ارائه شده است. فرضیه اول مربوط به تغییرات هومئوستاتیک مایعات بدن در بدو ورود به میکروگراویتی است که باعث تجمع مایعات بدن در قسمت‌های بالایی بدن از جمله جمجمه می‌گردد. این تغییرات با متورم شدن صورت همراه است و باعث افزایش فشار درون جمجمه‌ای، فشار مایع مغزی- نخاعی و یا فشار گوش داخلی می‌گردد و به اختلال در عملکرد گیرنده‌های دهلیزی موجود در گوش داخلی منتهی می‌گردد. فرضیه دوم به «ناسازگاری حسی»<sup>۳</sup> معروف است. بر اساس این فرضیه در بدو ورود به فضا سیگنال‌های اتولیتی گوش داخلی که مرتبط با وضعیت شیب بدن انسان<sup>۴</sup> هستند از دست می‌روند و در ادامه تضاد بین سیگنال‌های حسی مورد انتظار و سیگنال‌های واقعی در ناحیه دهلیزی گوش داخلی منجر به SMS می‌شود [۲۸]. این شرایط باعث تحریک بیش از اندازه سیستم وستیبولار می‌گردد که اختلال در ترشح اسید معده را به همراه دارد. اختلال در ترشح اسید تعادل الکترولیتی و انقباضات ریتمیک معده را تغییر می‌دهد. همه این شرایط در نهایت به تغییر در زمان تخلیه معدی و تغییر در الگوی انتقال روده‌ای مواد غذایی منتهی می‌گردد که بی‌اشتهایی را القا می‌نماید [۲۹، ۳۰]. از سوی دیگر در غیاب جاذبه خون رسانی به اندام‌های تحتانی

(BMR)<sup>۱</sup> و از سوی دیگر استفاده از ذخایر انرژی درون سلولی سلولی مانند گلیکوژن، پروتئین و چربی است. در این شرایط بدن فضانوردان به منظور کاهش BMR، حجم توده‌های بافتی فعال به خصوص توده‌های بافت ماهیچه که قسمت عمده BMR را شامل می‌شود را می‌کاهد. از طرف دیگر تأمین انرژی از ذخایر داخل سلولی به از دست رفتن آب بدن منتهی می‌گردد، زیرا ذخایر داخل سلولی مانند گلیکوژن و پروتئین‌ها به طور قابل توجهی به آب بدن متصل هستند. به طور مثال به منظور تأمین ۴/۲ میلی ژول انرژی از گلیکوژن نیاز به متابولیسم ۲۵۰ گرم گلیکوژن است که این باعث از دست رفتن یک لیتر آب بدن می‌شود [۹]. تعادل انرژی منفی علاوه بر کاهش توده ماهیچه و تغییر در آب و الکترولیت باعث اختلال در ترمیم زخم، اختلال در سیستم ایمنی و تغییرات قلبی عروقی نیز می‌گردد (شکل ۳) [۲۶].

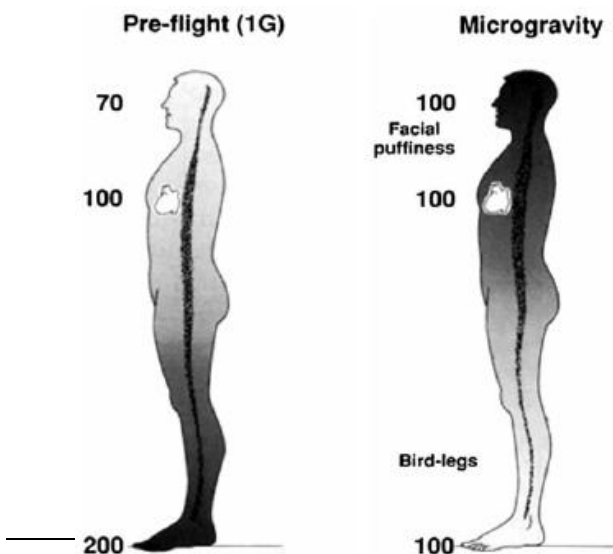
بی‌اشتهایی به عنوان یکی از مهمترین دلایل کاهش دریافت انرژی در فضانوردان مطرح است. مطالعات نشان داده‌اند بی‌اشتهایی در یک فضانورد با وزن ۷۰ کیلوگرم به کمبود ۱۳۳۰ کیلوکالری انرژی در روز منجر می‌گردد که این کمبود کالری می‌تواند بر عملکرد فضانوردان اثرگذار باشد [۲۷]. مکانیسم‌های عصبی، قلبی و عروقی و گوارشی در ایجاد بی‌اشتهایی در فضانوردان دخیل هستند. مهمترین مکانیسم عصبی درگیر در القای بی‌اشتهایی در رابطه با اختلال بیماری حرکت در فضا (SMS)<sup>۲</sup> است. SMS شرایطی است که در دو سوم از همه فضانوردان در اولین روزهای سفر مشاهده شده است، علائم و شدت آن در فضانوردان مختلف متغیر است و شامل رنگ پریدگی، افزایش گرمای بدن، تعریق سرد، ضعف، حساسیت به حرکت، سردرد، کاهش اشتها، درد شکمی، تهوع و استفراغ است. زمان شروع این سندروم بین ۱۵ دقیقه تا ۳ روز پس از پرواز بین فضانوردان متفاوت و علائم آن

3. Sensory conflict  
4. Tilt-related otolith signals

1. Basal Metabolic Rate  
2. Space motion sickness

مطالعات چندین ساله بر متابولیسم آب و الکترولیت، وضعیت آب بدن، تنظیمات هورمونی در طی فضانوردی و دوره بعد از فضانوردی حاکی از نقش مهم هموستاز آب و الکترولیت بر انطباق بدن انسان با شرایط بی وزنی است. مشخص شده است در بی وزنی، شرایط برای ایجاد تعادل منفی مایعات و الکترولیت‌های اساسی مهیا می‌شود که این امر به از دست رفتن آب بدن فضانوردان منتهی می‌گردد. پس از بازگشت از یک سفر فضایی بلندمدت واکنش انطباقی به منظور میزان حجم مایعات خارجی ازدست رفته پدیدار می‌شوند [۱۰]. در سطح زمین و در حضور گراویتی فشار هیدرواستاتیک در عروق خونی منجر به تجمع آب در قسمت‌های پایینی بدن مانند پاها می‌گردد (شکل ۴).

زیرا گراویتی یک گرادیان هیدرواستاتیک در طول بدن انسان ایجاد می‌نماید. قسمت‌هایی از سیستم عروقی انسان که در آنجا فشار هیدرواستاتیک مداوم برقرار است نقطه خنثی هیدرواستاتیکی (HIP) بدن انسان نامیده می‌شود. تحت شرایط گراویتی، عروقی که در قسمت‌های بالایی از HIP حضور دارند دارای فشار هیدرواستاتیک صفر یا حتی منفی هستند در حالیکه عروقی که در زیر HIP قرار دارند مانند عروق پا دارای فشار هیدرواستاتیک مثبت هستند. این گردیان فشار هیدرواستاتیک که تحت جاذبه ایجاد شده است باعث



شکل ۴- تغییر فشار خون آنورتی و پخش آب و املاح در شرایط گراویتی و میکروگراویتی [۳۲]

بدن کاهش می‌یابد که این خود نیز جریان خون احشائی<sup>۱</sup> که خون رسانی به دستگاه گوارش را انجام می‌دهد را به طور قابل توجهی کاهش می‌دهد. جریان خون احشائی از مهمترین عوامل دخیل در تخلیه معدی و زمان گذر مواد غذایی در روده است [۲۷, ۳۱]. افزایش غلظت نوروپپتیدهای مرتبط با استرس شامل فاکتور آزاد کننده کورتیکوتروپین (CRF)<sup>۲</sup>، کورتیکواستروئید و کاتکول آمین‌ها نیز بی‌اشتهایی در فضانوردان را القا می‌نماید. این نوروپپتیدها در پاسخ به استرس‌های محیطی، فیزیکی و فیزیولوژیکی، روانشناسی، شغلی و رفتاری فضانوردان افزایش می‌یابند [۳۱]. تولید سروتونین در پاسخ به مصرف غذاهای غنی از کربوهیدرات نیز بر کاهش بی‌اشتهایی در فضانوردان اثر گذار است. بر اساس مطالعات غذایی در فضانوردان، مشخص شده است اغلب فضانوردان مصرف مواد غذایی پر کربوهیدرات را به غذاهای غنی از چربی ترجیح می‌دهند. دلیل این انتخاب مشخص است، غذاهای غنی از کربوهیدرات ورود اسید آمینه تریپتوفان که به عنوان پیش ساز سروتونین شناخته می‌شود را به مغز افزایش داده و بدین ترتیب سنتز سروتونین را افزایش می‌دهد. این غذاهای غنی از کربوهیدرات هم به طور مستقیم و هم به واسطه ترشح انسولین آزادسازی تریپتوفان به وسیله سلول‌های محیطی و برداشت این آمینو اسید توسط سلول‌های مغزی در مقایسه به آمینو اسیدهای زنجیره بلند و شاخه‌دار را تقویت می‌نماید. انسولین برداشت آمینواسیدهای زنجیره بلند و شاخه‌دار به وسیله ماهیچه‌ها را تحریک می‌نماید و بنابراین نسبت اسیدآمینه تریپتوفان به این آمینواسیدها را افزایش داده و بدین ترتیب ورود تریپتوفان به مغز را تسهیل می‌نماید. تولید زیاد سروتونین در حضور غلظت‌های بالای پیش ساز هورمونی خودش اگرچه کاهش استرس در فضانوردان را به همراه دارد اما در القای بی‌اشتهایی در آنها نیز دخیل است [۳۱].

### تغییرات در هموستاز آب و الکترولیت

1. Splanchnic
2. corticotropin-releasing factor



حکایت دارد. این در حالی است که فشار ورید مرکزی<sup>۴</sup> به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش یافته است [۳۳، ۳۴]. شدیدترین تغییرات در وضعیت آب و مایعات بدن در اولین روز بعد از ورود به شرایط بی‌وزنی اتفاق می‌افتد و در ادامه آن تغییرات همودینامیک، تغییرات در فعالیت هورمون‌های تنظیم‌کننده حجم مایعات بدن، تغییرات اولیه در آب و الکترولیت و تغییرات در فعالیت کلیوی رخ می‌دهد. در این شرایط باز جذب آب و الکترولیت در توبول‌های کلیوی کاهش می‌یابد، فیلتراسیون گلومرولی تقویت می‌شود و دیورز<sup>۵</sup> و تخلیه ترکیبات فعال اسموتیک به‌طور قابل‌توجهی افزایش می‌یابد و این شرایط با کاهش مصرف آب در فضانوردان همزمان می‌گردد. بنابراین شرایط برای توسعه تعادل منفی آب و الکترولیت‌های اصلی مهیا می‌گردد. ایجاد وضعیت هیپوهیدراسیون در بدن فضانوردان باید به‌عنوان یک پاسخ دفاعی تطبیقی در برابر یک وضعیت غیرمعمول در نظر گرفته شود. این شرایط غیرنرمال ایجاد شده در شرایط بی‌وزنی با توزیع مجدد مایعات بدن همراه است که باعث تجمع آب و مایعات در قسمت‌های بالایی بدن به‌خصوص سر و سینه می‌گردد و کاهش میزان مایعات در قسمت‌های پایینی بدن می‌گردد که به ایجاد ظاهر صورت ورم کرده<sup>۶</sup> منتهی می‌گردد (شکل ۵) و در غیاب انطباق‌های جدید می‌تواند خطرات مرگباری برای فضانوردان به وجود آورد. انطباق‌های فیزیولوژیک جدید پس از حضور در شرایط بی‌وزنی باعث ایجاد حالت‌های مشابه هیپوولمیا<sup>۷</sup> می‌گردد که با دفع آب و الکترولیت‌ها باعث می‌گردد که در نهایت حجم پلاسما در حال گردش ۲۰-۱۵٪ کاهش یابد کاهش حجم پلاسما با کاهش تعداد سلول‌های خونی و کاهش اریتروپویتین همراه است که این شرایط می‌تواند به آنمی در فضانوردان منتهی شود [۳۳، ۱۰].



شکل ۵- ایجاد ظاهر Puffy face در فضانوردان بعد از شروع سفر فضایی [۱۲]

جریان خون و مایعات از قسمت‌های بالایی به سمت قسمت‌های پایینی می‌شود. این شرایط باعث می‌شود که فشار خون آرتریولی در تمام قسمت‌های بدن یکسان شود. در شرایط مایکروگراویتی عدم حضور این گرادیان هیدرواستاتیک باعث حرکت خون و مایعات از سیاهرگ‌های قسمت‌های پایینی بدن به سمت قسمت‌های بالایی و تجمع مایعات و خون به خصوص در سر و سینه می‌شود و باعث افزایش فشار خون در عروق قسمت‌های فوقانی HIP و کاهش فشار خون در قسمت‌های تحتانی HIP می‌گردد. به دلیل اینکه حجم سیاهرگ‌های گردن و سینه کم است مقدار کمی از این مایعات در عروق این قسمت‌ها تجمع می‌یابد و اکثر مایعات شیف یافته در ناحیه قلبی - ششی تجمع می‌یابند. در این شرایط فشار خون آرتریولی قسمت‌های بالایی به طور قابل ملاحظه‌ای نسبت به نواحی پایینی بدن افزایش می‌یابد. مطابق مکانیسم فرانک-استارلینگ<sup>۱</sup> این اتفاق باعث افزایش حجم و برون ده قلب می‌شود. الکتروکاردیوگرام در طی اولین روز از سفر از افزایش بازده سیستولی<sup>۲</sup> و حجم دیاستولیک پایانی<sup>۳</sup> در دهلیز چپ

4. Central venous pressure (CVP)

5. Diuresis

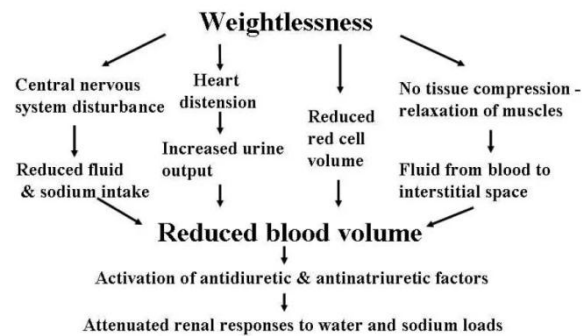
6. Puffy face

7. Hypovolemia

1. Frank-Starling

2. Systolic output

3. Final diastolic volume



شکل ۶- مکانیسم‌های کاهش حجم خون و پاسخ کلیه‌ها در شرایط بی‌وزنی [۳۵]

### تغییرات در متابولیسم کلسیم و استخوان

یکی از مهم‌ترین اثرات بی‌وزنی مداوم که در طی سفرهای فضایی طولانی‌مدت مشاهده می‌گردد از دست رفتن وسیع توده‌های استخوانی و کلسیم بدن است. مطالعات بسیار زیادی بر روی متابولیسم کلسیم و از دست رفتن استخوان در فضانوردان انجام شده است. اما اولین اسناد مربوط به تعادل کلسیم منفی و افزایش دفع کلسیم از طریق ادرار به مطالعه بر روی فضانوردان جمینی و آپولو در اواخر ۱۹۶۰ و اوایل ۱۹۷۰ باز می‌گردد. اگرچه در این مطالعه افزایش دفع کلسیم از طریق مدفوع و ادرار در طی سفرهای فضایی کوتاه‌مدت (۱ تا ۲ هفته) مورد تأیید قرار گرفت اما تغییرات واقعی در استخوان اولین بار در سال ۱۹۷۴-۱۹۷۳ در فضانوردان اسکای لب در یک سفر فضایی طولانی‌مدت مشاهده شد. در این مطالعه تراکم و حجم استخوان فضانوردان قبل و بعد از سفر فضایی با استفاده از دانسیتومتری مورد مطالعه قرار گرفت [۴۰-۳۸]. در این مطالعه جامع، در سه دسته فضانورد که مدت‌زمان حضور آنها در فضا یکسان نبوده است. مصرف کلسیم، دفع ادراری کلسیم و دفع از طریق مدفوع قبل از سفر فضایی، در حین سفر فضایی و پس از بازگشت به زمین موردسنجش قرار گرفته است. نتایج در این سه دسته فضانورد از طریق ادرار نشان داده شده است که دفع کلسیم از طریق ادرار در اولین هفته حضور در فضا افزایش داشته است و پس از یک ماه به حداکثر مقدار رسیده است و تا زمان بازگشت به زمین ثابت ماند. افزایش دفع کلسیم از طریق مدفوع پس از ۸-۶ هفته پس از حضور در فضا شروع شده است

کاهش حجم خون تا جایی ادامه می‌یابد که در نهایت یک تعادل آب و الکترولیت جدید ایجاد گردد. ترشح هورمون‌ها و فاکتورهای ضدادراری که باعث کاهش پاسخ‌دهی کلیه‌ها به آب و سدیم می‌شوند در نهایت از ادامه کاهش حجم خون جلوگیری می‌نمایند. این مکانیسم‌ها به طور شماتیک در شکل ۶ آورده شده است.

مهم‌ترین پارامتر تعیین‌کننده وضعیت هموستاز ترکیبات معدنی بدن ارزیابی ترکیبات یونی سرم خون است. یک مطالعه بر روی وضعیت الکترولیتی سرم فضانوردان روسی یک هیپوکالمی<sup>۱</sup> ملایم ناشی از آتروفی ماهیچه‌ها و افزایش در غلظت کلسیم یونیزه را نشان داده است. ویژگی این تغییرات غیر وابستگی این تغییرات یونی به مدت‌زمان سفر فضایی بوده است. غلظت سدیم، توتال کلسیم، منیزیم و ترکیبات فعال اسموتیک هیچ تغییری را نشان نداده است [۱۰، ۳۶]. اگرچه در مطالعه محدودی افزایش غلظت سدیمی سرم مدت کوتاهی بعد از شروع سفر فضایی گزارش شده است که آن را به از دست رفتن آب بدن و کاهش حجم مایعات بدن مرتبط می‌دانند. در یک مطالعه مشابه بر روی فضانوردان ایستگاه فضایی میر که به مدت ۴۳۶-۱۱۵ روز در فضا حضور داشته‌اند نتایج مشابه بوده است. در این فضانوردان نیز کاهش اندک ۴/۴٪ در غلظت سرمی پتاسیم و افزایش غلظت کلسیم یونیزه به میزان ۶/۹٪ مشاهده شده است و غلظت سایر ترکیبات یونی تغییر محسوسی نداشته است. نکته قابل‌توجه این است که اگرچه متابولیسم کلسیم، سدیم و پتاسیم در نتیجه تغییرات در وضعیت حجم مایعات بدن، آتروفی ماهیچه‌ای و تحلیل استخوان‌ها در طی حضور در فضا دچار اختلال می‌گردد اما وضعیت غلظت خونی این الکترولیت‌ها تغییرات ملایمی را نشان داده است. این نشان‌دهنده آمادگی ارگان‌های بدن انسان برای انطباق با محیط‌های جدید است [۳۷].

### 1. Hypokalemia

پیرویدینولین<sup>۵</sup>، داکسی‌پیریدینولین<sup>۶</sup>، N-تلوپتید<sup>۷</sup> و C-تلوپتید از مهم‌ترین کراس‌لینک‌های کلاژن هستند که با استفاده از HPLC در ادرار اندازه‌گیری می‌شوند. اندازه‌گیری این کراس‌لینک‌های کلاژنی به منظور تعیین وضعیت تحلیل استخوانی نسبت به اندازه‌گیری هیدروکسی‌پرولین و هیدروکسی‌لیزین مزیت‌هایی دارد. این ترکیبات تنها در کلاژن‌های بالغ تشکیل می‌شوند بنابراین آزاد شدن آنها در خون نشان‌دهنده تحلیل کلاژن‌های بالغ است، از طرفی غلظت کراس‌لینک‌های کلاژنی در خون تحت تأثیر تغذیه نیست چون به وسیله دستگاه گوارش جذب نمی‌شوند. مزیت دیگر آنها این است که نمونه‌های مورد استفاده برای آنالیز آنها را می‌توان به مدت طولانی به صورت فریز شده نگهداری نمود که این مورد در سفرهای فضایی از اهمیت قابل توجهی برخوردار است. استفاده از مارک‌های استخوانی اگرچه اطلاعات خوبی در رابطه با وضعیت تشکیل یا تحلیل استخوانی ارائه می‌دهد اما دارای محدودیت‌هایی نیز هستند. یکی از مهم‌ترین محدودیت‌های استفاده از مارک‌های استخوانی این است که تغییر در این مارک‌ها انعکاسی از وضعیت متابولیسم توده استخوانی در تمام سیستم استخوانی بدن است بنابراین استفاده از این مارک‌ها برای تعیین وضعیت استخوانی باید همراه با دیگر تست‌ها (مثلاً اندازه‌گیری دانسیته استخوان) باشد [۴۱، ۱۱].

### تغییرات در سیستم اندوکرینی بدن فضانوردان

#### ۱- تغییر در هورمون‌های کاتابولیک و آنابولیک

بقای موجودات پرسلولی بستگی به توانایی آنها در سازش با محیطی دارد که در حال تغییر دائمی است. به منظور برقراری این سازش، ارتباطات سلولی امری ضروری است. سیستم اندوکرینی به عنوان یکی از ابزارهای مهم برای ایجاد ارتباطات سلولی در سرتاسر بدن موجودات پرسلولی شناخته می‌شوند.

و تا بازگشت به سطح زمین این افزایش دفع حفظ شده است. جذب روده‌ای کلسیم که از اختلاف بین میزان مصرف و میزان دفع کلسیم از طریق مدفوع به دست می‌آید در فضانوردانی که به مدت ۱ ماه در فضا حضور داشتند بدون تغییر بوده است اما در دو دسته فضانورد دیگر به مدت ۳-۲ ماه در فضا حضور داشتند به طور قابل توجهی کاهش نشان داده است [۳۹]. علاوه بر آنالیز دفع ادراری و جذب روده‌ای کلسیم آنالیز بیومارک‌های تشکیل<sup>۱</sup> و تحلیل<sup>۲</sup> استخوان نیز در بعضی از مطالعات حاکی از وجود یک تعادل منفی کلسیم در طول سفر فضایی است. مطالعات بر روی فرآیندهای منتهی به تشکیل استخوان نشان داده‌اند که در طی سفرهای فضایی تشکیل استخوان کاهش یا بدون تغییر مانده در حالی که تحلیل استخوان به طور قابل توجهی افزایش یافته است. آلکالین فسفاتاز<sup>۳</sup> و استئوکلسین دو مارکر مهم تشکیل استخوان هستند که در سرم و ادرار به منظور تعیین وضعیت تشکیل استخوان آنالیز می‌گردد. در یک مطالعه بر روی فضانوردان ایستگاه فضایی میر مشخص شده است که غلظت این دو مارکر تشکیل استخوان در سرم یا ادرار فضانوردان کاهش یا ثابت مانده است [۱۱، ۳۹، ۴۱، ۴۲]. اندازه‌گیری هیدروکسی‌پرولین و هیدروکسی‌لیزین در ادرار به عنوان مارک‌های تحلیل استخوان مورد استفاده قرار می‌گیرند. این اسیدآمینها حاصل تغییرات پس از ترجمه<sup>۴</sup> کلاژن هستند بر اثر شکسته شدن کلاژن موجود در استخوان‌ها در خون افزایش و وارد ادرار می‌شوند. در یک مطالعه بر روی فضانوردان اسکای لب ۴ مشخص شد که دفع ادراری هیدروکسی‌پرولین در طول ۸۴ روز سفر فضایی ۳۳٪ کاهش داشته است [۱۱، ۴۳]. آنالیز کراس‌لینک‌های کلاژن در ادرار که در نتیجه شکسته شدن کلاژن استخوان دفع آنها افزایش می‌یابد به عنوان مارک‌های تحلیل استخوانی مورد توجه قرار گرفته است.

1. Bone Formation
2. Bone resorption
3. Alkaline phosphatase
4. Posttranslation modifications

5. Pyroidinolin
6. Deoxypyridinoline
7. Telopectid

خونی آن در فضانوردان نسبت به افراد بر روی زمین به طور قابل ملاحظه‌ای بالاتر است. علاوه بر کورتیزول غلظت هورمون‌های کاتابولیک دیگر مانند انسولین، کاتکول آمین‌ها، آدنوکورتیکوتروپین هورمون (ACTH) نیز افزایش نشان داده است که اینها نیز کاتابولیسیم پروتئین‌ها را تحریک می‌نماید [۲۴، ۲۷، ۳۶، ۴۴، ۴۵]. اثرات منفی تغییرات در این هورمون‌های کاتابولیک بر کاتابولیسیم پروتئین‌ها و از دست رفتن توده‌های بدنی با کاهش هورمون‌های آنابولیکی مانند تستوسترون بیشتر تقویت می‌گردد. در یک مطالعه به‌وسیله استرولو<sup>۱</sup> و همکارانش مشخص شده است که غلظت خونی تستوسترون بعد از ۵ روز از یک سفر فضایی ۵۰٪ نسبت به سطح زمین کاهش یافته است. در این مطالعات اگرچه مشخص شده است، تغییرات در نسبت هورمون‌های آنابولیک به کاتابولیک بر کاهش پروتئین‌های ماهیچه‌ای اثرگذار است اما دوره این تغییرات مشخص نشده است [۴۶]. در شرایط دیگری مانند تروما نیز نسبت کورتیزول به تستوسترون بالاست و این نسبت بالا شکسته شدن پروتئین‌های ماهیچه‌ای را تقویت می‌نماید [۲۷، ۴۷، ۴۸].

مایکروگراویتی علاوه بر اینکه متابولیسیم پروتئین‌ها را در ماهیچه‌ها به‌طور قابل توجهی تحت تأثیر قرار می‌دهد، باعث تغییراتی در متابولیسیم کربوهیدرات‌ها و چربی‌ها در ماهیچه نیز می‌گردد. مطالعات نشان داده‌اند، ماهیچه‌ها در شرایط مایکروگراویتی در یک انطباق متابولیکی، استفاده از منابع کربوهیدراتی را به منبع چربی ترجیح می‌دهند. این تغییر متابولیسمی از چربی به قند در ماهیچه‌ها که در سطح ژنی و پروتئینی نیز مورد مطالعه قرار گرفته است با عوارضی مانند ضعف، عدم هماهنگی، خستگی و تأخیر در شروع درد عضلانی همراه است. در یک مطالعه بر روی چرخه‌های متابولیسیم انرژی در ماهیچه موش‌های واقع شده تحت شرایط مایکروگراویتی مشخص شده است، در سلول‌های ماهیچه‌ای آنها بیان ژن‌های

سیستم اندوکرینی با ترشح هورمون‌ها، فعالیت و غلظت پروتئین‌ها را تغییر می‌دهد که سازگاری‌های هموستاتیک یک موجود پرسلولی نسبت به تغییرات محیطی مداوم را تنظیم می‌نماید. هورمون‌ها پس از اتصال به گیرنده سطح سلول منجر به تولید یک پیام داخل سلولی می‌شوند که می‌تواند فعالیت یک دسته انتخابی ژن‌ها را تنظیم نماید و بدین ترتیب غلظت بعضی پروتئین‌ها در سلول هدف و یا فعالیت پروتئین‌های اختصاصی نظیر آنزیم‌ها، انتقال دهنده‌ها یا کانال‌های یونی را تغییر دهد. این پیام می‌تواند بر فرآیندهای عمومی بدن مانند سنتز پروتئین‌ها، رشد سلول و همانندسازی اثرگذار باشد [۱، ۲۲]. علاوه بر مکانیسم‌هایی که تاکنون در ارتباط با از دست رفتن توده‌های ماهیچه‌ای ذکر شد، تغییرات در پروفایل‌های هورمونی در طی فضانوردی نیز به عنوان یک عامل مهم در از دست رفتن توده بدنی به خصوص پروتئین‌های عضلات مورد توجه است [۶، ۲۷]. به طوری که در یک مطالعه بر روی فضانوردان ایستگاه فضایی میر که به مدت ۳ ماه در این ایستگاه حضور داشتند مشخص شده است که در بعضی فضانوردان علی‌رغم دریافت کالری کافی یا حتی بیشتر نسبت به روی زمین باز هم کاهش ۳۰٪ در توده بدنی وجود داشته است. این مطالعه نشان داده است که دریافت کالری کافی به تنهایی نمی‌تواند از دست رفتن توده بدنی در فضانوردان را مهار نماید و عوامل دیگری نیز در فرآیند کاهش توده بدنی دخیل هستند [۲۴]. در مطالعات مختلف بر روی فضانوردان مشخص شده است که طی سفرهای فضایی کوتاه و بلند مدت هورمون‌های آنابولیک و کاتابولیک دچار تغییرات محسوسی می‌گردد. این مطالعات نشان داده‌اند که در بدو ورود به شرایط مایکروگراویتی غلظت خونی هورمون کورتیزول و دفع ادراری آن به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد. کورتیزول یک هورمون کاتابولیک است که در پاسخ به استرس‌های فضایی در بدن فضانوردان افزایش می‌یابد و باعث تقویت متابولیسیم پروتئین‌ها در بدن می‌گردد. اگر چه افزایش غلظت کورتیزول و از دست رفتن توده بدنی با شرایطی مانند تروما قابل مقایسه نیست اما مطالعات نشان داده‌اند سطح

شرایط بی‌وزنی کاهش در ترشح هورمون آنتی دیورتیک (ADH) و هورمون‌های سیستم رنین- آنژیوتانسین- آلدسترون (RAAS) مشاهده شده است و همزمان با آنها افزایش در ترشح پپتید ناتریورتیک دهلیزی (ANP)<sup>۳</sup> گزارش شده است. نقش غالب این تغییرات بر رفلکس‌های تنظیم‌کننده مایعات بدن است و باید توجه کرد که این تغییرات بر وضعیت سرمی ترکیبات فعال اسموتیک و غلظت خونی الکترولیت‌های سرم اثری ندارد [۱۱، ۳۶]. در زمان بازگشت فضاوردان به سطح زمین به دلیل انطباق‌های جدیدی که بدن فضاوردان در طی سفر فضایی کسب نموده‌اند فضاوردان قادر به حفظ تعادل خود در حالت ایستاده نیستند که به این حالت بی تعادلی اورتواستاتیک (OI)<sup>۴</sup> گفته می‌شود. وضعیت OI به دلیل ناتوانی بدن به انتقال مایعات به سمت قسمت‌های بالایی بدن به‌خصوص مغز در حالت ایستاده ایجاد می‌گردد که ناشی از انطباق‌های جدیدی است که دستگاه‌های مختلف بدن در طی سفر فضایی کسب کرده‌اند. کاهش حجم خون قلب و عروق، هیپوولمی حاد، کم‌خونی، کاهش حساسیت بارو رسپتورها کاهش توده قلبی و کاهش توده‌های ماهیچه‌ای از مهم‌ترین سازگاری‌هایی است که در طی سفر فضایی ایجاد شده و در زمان بازگشت به سطح زمینی وضعیت OI را به وجود می‌آورند [۳۸، ۵۳]. بنابراین در زمان ورود به سطح زمین بدن نیاز به کسب سازگارهای جدیدی به خصوص در وضعیت مایعات بدن دارد. در این شرایط غلظت هورمون‌هایی مانند آنتی‌دیورتیک هورمون و سیستم RAAS افزایش می‌یابد و غلظت ANP کاهش می‌یابد؛ باز جذب آب و الکترولیت‌ها تقویت می‌شود و فیلتراسیون گومرولی کاهش می‌یابد؛ دیورزو تخلیه ترکیبات فعال اسموتیک محدود می‌گردد و این شرایط به ایجاد یک بالانس خالص مثبت در وضعیت مایعات و الکترولیت‌ها بدن منتهی می‌گردد که در نهایت هیپولومیا ناشی از سفر فضایی را

درگیر در متابولیسم چربی‌ها شامل ژن‌های دخیل در بتا اکسیداسیون اسیدهای چرب، اکسیداسیون پراکسی‌زومی، اکسیداسیون اسیدهای چرب غیراشباع و زنجیره بلند و آنزیم‌های دخیل در انتقال اسیدهای چرب به منظور اکسیداسیون در میتوکندری به‌طور قابل توجهی کاهش یافته است درحالی‌که ژن‌های درگیر در متابولیسم کربوهیدرات‌ها شامل آنزیم‌های گلیکولیز، فسفوفروکتوکیناز عضلانی، آلدولاز، هگژوکیناز و گلوکوکیناز به‌طور محسوسی افزایش بیان نشان داده است. این مطالعه تغییرات متابولیسمی از چربی به کربوهیدرات‌ها در ماهیچه‌ها تحت شرایط مایکروگروایتی را تأیید می‌نماید. اگر چه علل این تغییر سوخت به‌طور کامل شناخته نشده است اما چندین فرضیه در این زمینه موجود است. بعضی از محققان تبدیل میوفیبریل‌های ماهیچه‌ای کند<sup>۱</sup> به میوفیبریل‌های ماهیچه سریع<sup>۲</sup> در پاسخ به آتروفی ماهیچه‌ای را مطرح می‌نمایند. این مکانیسم با توجه به اینکه میوفیبریل‌های ماهیچه‌ای سریع گلیکولیتیک هستند در حالیکه میوفیبریل‌های ماهیچه‌ای کند بیشتر از چربی‌ها به‌عنوان منبع سوخت استفاده می‌نمایند مطرح شده است. مکانیسم دیگر در ارتباط با عدم تحرک یا کاهش تحرک فیزیکی است. با توجه به اینکه سفر فضایی با یک برنامه ورزشی برای ماهیچه‌ها در تضاد است این موضوع مطرح می‌گردد که در غیاب برنامه ورزشی مناسب ماهیچه‌ها تمایل دارند از سوخت‌هایی که بیشتر در دسترس هستند مانند ذخایر گلیکوژنی استفاده نمایند این در حالی است که ماهیچه‌ها تحت یک برنامه ورزشی شدید بیشتر از ذخایر چربی بدن به منظور تأمین انرژی لازم استفاده می‌کنند [۵۲-۴۹].

#### ۲- تغییر در هورمون‌های مرتبط با متابولیسم آب و الکترولیت

انطباق‌های فیزیولوژیک در هموستاز آب و الکترولیت با تغییرات در وضعیت هورمونی انجام می‌شود. در شروع ورود به

3. Atrial natriuretic peptide  
4. Orthostatic intolerance

1. Slow switch myofibril  
2. Fast switch myofibril

بر متابولیسم کلسیم و از دست رفتن توده استخوانی نقش دارد [۱۱، ۳۹، ۴۲، ۴۳]. مطالعات نشان داده‌اند که غلظت گلیکوکورتیکوئیدها در خون فضانوردان در طی اولین ماه از سفر فضایی ۷۴٪ افزایش می‌یابد. گلیکوکورتیکوئیدها سنتز DNA در استئوبلاست‌ها که برای تشکیل استخوان ضروری است را مهار می‌نماید. مهار سنتز DNA در استئوبلاست‌ها به واسطه مکانیسم‌های مرتبط با مهار پروستوگلاندین E2 توسط گلیکوکورتیکوئیدها انجام می‌شود. پروستوگلاندین E2 با اتصال گیرنده‌های سطح سلول مسیرهای سیگنالینگ فسفولیپاز C را فعال می‌نماید. افزایش فسفولیپاز در ادامه باعث افزایش اینوزیتول  $3-$  فسفات می‌شود که منجر به افزایش غلظت پیامبر ثانویه  $Ca^{++}$  می‌گردد. کلسیم با ورود به هسته سلول و با اتصال به DNA، باعث افزایش بیان ژن‌های مرتبط با سنتز استئوبلاست‌ها می‌گردد و بدین صورت باعث القاء استخوان‌سازی می‌شود. اما در حضور غلظت‌های بالای گلیکوکورتیکوئیدها، آنزیم سیکلواکسیژناز (COX) که مسئول سنتز پروستوگلاندین‌ها است مهار می‌گردد. مهار آنزیم COX باعث کاهش سنتز پروستوگلاندین E2 و کاهش مسیرهای سیگنالینگ منتهی به استخوان‌سازی می‌گردد و بدین صورت به کاهش تشکیل استخوان منجر می‌شود [۶، ۳۹].

### اقدامات قبل و پس از سفر فضایی

فضانوردان ماه‌ها یا سال‌ها قبل از انجام سفر فضایی تحت یک سری اقدامات تمرینی و مراقبتی قرار می‌گیرند تا تمام شرایط لازم برای سفر فضایی را کسب نمایند. بعضی از این اقدامات به منظور آشنایی و سازگاری فیزیولوژیک بدن فضانوردان در شرایط شبیه‌سازی شده با سفر فضایی انجام می‌شود. یکی از مهمترین تمرین‌های قبل از سفر فضایی انجام پروازهای سهموی و اکروباتیک<sup>۱</sup> است. این نوع از پروازها ابزارهای مناسبی به منظور کاهش مصنوعی جاذبه هستند که

جبران و فضانورد را به حالت نرمال بازمی‌گرداند. به‌منظور جلوگیری از ایجاد OI در زمان بازگشت فضانوردان و تسریع کسب سازگاری‌های جدید کمی قبل از ورود به سطح زمین به فضانوردان توصیه می‌گردد که نمک طعام مصرف نمایند [۱۰].

### ۳- تغییر در هورمون‌های مرتبط با متابولیسم استخوان

برای مطالعه جزئی‌تر از دست رفتن توده‌های استخوانی تحت شرایط بی‌وزنی، بعضی از مطالعات بر روی تنظیمات اندوکرینی استخوان و متابولیسم کلسیم متمرکز شده‌اند. به‌طور عمومی تغییر در وضعیت اندوکرینی متابولیسم استخوان انعکاسی از سازگاری نسبت به شرایط بی‌وزنی است. در غیاب اشعه فرابنفش و کاهش مصرف ویتامین D در طی فضانوردی ذخیره‌های ویتامین D در بدن حذف می‌شوند. اگرچه در بعضی سفرهای فضایی فضانوردان با مکمل‌های ویتامین D محافظت می‌شوند اما این مکمل‌ها قادر به اصلاح از دست رفتن استخوان نیست و تنها از کمبود شدید ویتامین D جلوگیری می‌نماید [۴، ۶]. کاهش هورمون پاراتیروئید که در فضانوردان مشاهده شده است نیز باعث کاهش بیشتر ویتامین D فعال (۱-۲۵ دی هیدروکسی ویتامین D) می‌گردد زیرا هورمون پاراتیروئید باعث القاء ۱- $\alpha$  هیدروکسیلاز می‌گردد. آنزیم ۱- $\alpha$  هیدروکسیلاز که در کلیه‌ها موجود است ۲۵- هیدروکسی ویتامین D را به شکل فعال ویتامین D تبدیل می‌کند. کاهش هورمون پاراتیروئید می‌تواند به دلیل هیپرکلسیمی باشد که در نتیجه تحلیل استخوان‌ها و ورود کلسیم از استخوان‌ها به جریان خون رخ می‌دهد. به نظر می‌رسد تحلیل استخوانی تحت شرایط بی‌وزنی نوعی سازگاری است که پاسخ به کاهش توده‌های بدنی در شرایط بی‌وزنی اتفاق می‌افتد. کاهش در فرم فعال ویتامین D جذب کلسیم از طریق روده را کاهش می‌دهد و همه این شرایط در نهایت باعث افزایش دفع کلیوی کلسیم، کاهش باز جذب کلسیم از روده و از دست رفتن توده استخوانی می‌گردد. علاوه بر کاهش فرم فعال ویتامین D و هورمون پاراتیروئید افزایش در غلظت هورمون گلیکوکورتیکوئیدی در پاسخ به استرس‌های فضایی نیز جز عوامل هورمونی است که

1. Parabolic or aerobatic flights

صورت تزریق درون‌رگی<sup>۹</sup> و مصرف آب فراوان نیز به فضانوردان توصیه می‌شود. انجام یکسری تمرینات ورزشی به منظور احیاء ماهیچه‌ها، ماساژ و یخ‌گذاری و مصرف داروهای ضدالتهابی غیراستروئیدی برای بهبود ماهیچه‌ها انجام می‌شود. به طور مثال در یک مطالعه که به وسیله آژانس فضایی اروپا انجام شده است ورزش را به عنوان یک اقدام متقابل به منظور جلوگیری از تحلیل ماهیچه‌ای و افزایش ظرفیت قلبی توصیه می‌نماید. آنالیز توده معدنی استخوان به مدت سه سال بعد از سفر فضایی انجام می‌شود و در برخی موارد به فضانوردان توصیه می‌شود که بعضی فعالیت‌ها شامل پرواز با جت‌های سرعت بالا محدود گردد. جمع‌آوری نمونه‌های بیولوژیک به منظور آنالیز عملکرد و سلامت سیستم ایمنی فضانورد بلافاصله پس از فرود انجام می‌شود [۵۵، ۵۶].

### تغذیه فضانورد

تأمین غذای مورد نیاز فضانوردان در طی سفرهای فضایی یکی از مهمترین چالش‌های شرکت‌های فضایی از سال‌های ابتدایی شروع سفرهای فضایی تاکنون بوده است. غذای فضانوردان نه تنها باید نیازهای تغذیه‌ای فضانوردان را بر طرف نماید همچنین باید فضانوردان را در برابر اثرات منفی سفر فضایی محافظت نماید. مهمترین نکته در غذاهای فضایی علاوه بر طعم مناسب، مقدار کافی و غنی بودن از نظر ترکیبات مغذی، قابل حمل بودن و مسئله نگهداری در طی سفر فضایی است. یک سیستم تهیه غذاهای فضایی<sup>۱۰</sup> که در ناسا مسئول تحقیقات و توسعه غذاهای فضایی است، غذاها را از نظر مواد مغذی، بسته‌بندی، نگهداری مناسب و طعم چک می‌نمایند. فضانوردان ۵ ماه قبل از سفر منو غذای خود را از نظر رنگ، ظاهر، بو، طعم و ساختار انتخاب می‌نمایند. در ایستگاه فضایی بین‌المللی منو غذاها ظرف ۸ تا ۱۵ روز توسط نمایندگی‌های کشورهای عضو تهیه می‌گردد. شکل و فرم غذاهای فضایی از

در تحقیقات فضانوردی بر روی زمین و همچنین آماده سازی فضانوردان جهت پرواز فضایی انجام می‌شوند [۵۴، ۵۵]. از نظر فیزیولوژیک این نوع از پروازها برای آشنایی و نحوه مواجهه فضانوردان با شرایطی مانند SMS صورت می‌پذیرد. همچنین مصرف داروهای ضد تهوع<sup>۱</sup> کمی قبل از شروع پرواز به منظور مقابله با این شرایط کمک کننده است. تمرین‌های ورزشی شامل انجام ورزش‌های مقاومتی<sup>۲</sup> و ورزش‌های هوازی<sup>۳</sup> با هدف آمادگی‌های بدنی و مقابله با آتروفی ماهیچه‌ای قبل از سفر فضایی ضروری است. ارزیابی دانسیته معدنی استخوان‌ها<sup>۴</sup> که به وسیله اشعه ایکس<sup>۵</sup> انجام می‌گردد اقدامی است که ناسا<sup>۶</sup> به صورت سه بار در سال برای سفرهای کوتاه مدت و دو بار بعد از هر شش ماه برای سفرهای بلند مدت برای فضانوردان خود انجام می‌دهد. این آنالیزها به منظور آمادگی‌های استخوانی فضانوردان هم در فضانوردان دارای تجربه فضایی و هم در فضانوردان تازه کار انجام می‌شود. آزمون‌های سیکولوژیک به منظور آمادگی روحی و روانی فضانورد و تمرین برای انجام کارهای تیمی صورت می‌پذیرد. برنامه‌های قرنطینه‌ای و محدود کردن تماس فضانوردان یک هفته قبل از پرواز با هدف سلامت کامل سیستم ایمنی فضانوردان انجام می‌شود. پس از بازگشت فضانورد از سفر فضایی نیز انجام یکسری اقدامات محافظتی امری ضروری است. مصرف داروی میدودرین<sup>۷</sup> که یک منقبض کننده عروقی<sup>۸</sup> است و از کاهش فشار خون جلوگیری می‌نماید در بدو ورود و یا حتی کمی قبل از ورود فضانورد به سطح زمین به منظور مقابله با شرایطی مانند OI می‌تواند کمک کننده باشد. همچنین مصرف داروهای ضد تهوع به

1. Antinauseant medications
2. Rresistance exercise
3. Aerobic exercise
4. Bone mineral density
5. Dual-energy x-ray absorptiometry
6. National Aeronautics and Space Administration(NASA)
7. Midodrine
- 8 Vasopressor

9 Intravenous antinauseant

10 Foods Systems Engineering Facility

غذاهای فضایی است. ۷) مواد غذایی تازه<sup>۸</sup> شامل میوه‌های تازه تازه مانند سیب و موز است. ۸) غذاهای یخچالی<sup>۹</sup> غذاهای فضایی است که برای نگهداری نیاز به یخچال دارد. انواع پنیر خامه‌ای و خامه ترش جز این دسته هستند [۵۸، ۵۹].

### اقدامات متقابل برای غلبه بر اثرات خطرناک تغییرات فیزیولوژیک در حین فضانوردی

همان‌طور که در طی این مقاله ذکر شد، سفر فضایی با تغییرات فیزیولوژیک و بیوشیمیایی در بافت‌ها و اندام‌های بدن فضانوردان همراه است. از دست رفتن توده‌های ماهیچه‌ای، تغییر در وضعیت آب و الکترولیت‌ها، تغییر در متابولیسم کلسیم و از دست رفتن استخوان از مهم‌ترین تغییرات بیوشیمیایی و فیزیولوژیک است که در این مقاله به آنها اشاره شده است. هرچند این تغییرات به‌منظور سازگاری با شرایط بی‌وزنی توسط بدن فضانوردان ایجاد می‌گردد، اما بعضی از آنها می‌تواند سلامت فضانوردان را مورد تهدید قرار دهد و بر عملکرد آنها اثرگذار باشد. به همین دلیل برای حفظ سلامت فضانوردان اقدامات متقابلی جهت مقابله با این تغییرات توصیه می‌گردد. این اقدامات متقابل که شامل فرآیندهای ورزش فیزیکی و مکانیکی، اقدامات تغذیه‌ای (شکل ۷) و آنالیزهای هورمونی و بیوشیمیایی می‌گردد قبل، در حین و بعد از سفر فضایی انجام می‌گیرد. در حین سفر فضایی به‌منظور افزایش سنتز پروتئین‌ها در ماهیچه‌ها انجام ورزش‌های مقاومتی و هوازی، تحریکات الکتریکی ماهیچه‌ها [۵۵] و مصرف مکمل‌های غذایی سرشار از آمینواسیدهای ضروری توصیه می‌گردد [۴، ۲۱، ۶۰]. مصرف داروهای دیورتیک و کاهش مصرف آب در اولین روزهای سفر فضایی به‌منظور تسریع در سازگاری آب و الکترولیت در بدن فضانوردان [۱۱]، پوشیدن لباس‌های ضدجاذبه با فشار منفی که به صورت مکانیکی پخش مایعات بدن مشابه شرایط زمینی را مهیا می‌کند، مصرف مایعات ایزوتونیک، قرارگیری در

سال‌های اولیه از شروع سفرهای فضایی تا کنون تغییرات بسیار زیادی کرده است [۵۷، ۵۸]. اوایل غذاها به صورت کم حجم در فرم تیوبی یا به صورت پودرهای فشرده برای فضانوردان مهیا می‌شد که در بعضی موارد نارضایتی فضانوردان را به همراه داشت. امروزه با توسعه تحقیقات بر روی غذا‌های فضایی، غذا بیشتر به فرم غذاهای زمینی برای فضانوردان مهیا می‌گردد. غذاهای فضایی در ۸ فرم مختلف برای فضانوردان تهیه و ارسال می‌گردد که شامل (۱) مواد غذایی قابل احیاء<sup>۱</sup> است که در این نوع غذاها مواد خوراکی به صورت پودر تهیه و کمی قبل از مصرف در آب حل می‌شوند. اغلب نوشیدنی‌ها جزء این دسته غذاهای فضایی هستند. (۲) مواد غذایی تراموستیزه شده<sup>۲</sup> شامل غذاهایی است که پخته شده و به صورت کنسرو در آمده و شامل انواع میوه‌جات و ماهی‌ها است. (۳) مواد غذایی نیمه خشک<sup>۳</sup> شامل غذاهایی است که آب آنها به طور کامل گرفته نشده ولی فرم غذا خشک است و شامل انواع میوه‌های خشک شده مانند هلو و زرد آلو و گوشت گوساله خشک شده با گرما هستند. (۴) مواد غذایی به شکل طبیعی<sup>۴</sup> غذاهایی است که به فرم طبیعی در بسته‌بندی‌های انعطاف‌پذیر آماده و مصرف می‌گردد و شامل انواع بیسکویت و آجیل‌ها هستند. (۵) مواد غذایی اشعه دیده<sup>۵</sup> شامل استیک گوساله و گوشت دودی شده است که پس از پخته شدن و بسته‌بندی در فویل‌های انعطاف‌پذیر با اشعه یونیزان استریل می‌گردد تا بتوان آنها را در دمای اتاق نگهداری نمود. (۶) مواد غذایی فریز شده<sup>۶</sup> شامل یکسری غذاهای آماده خورده شدن است که پس از پخته شدن فریز شده است. کاسرول (نوعی غذای تهیه شده از گوشت)، کوئچ (نوعی پای گوشت) و پای مرغ<sup>۷</sup> جزء این دسته از غذاهای

1. Rehydratable Food
2. Thermostabilized Food
3. Intermediate Moisture Food
4. Natural Form Food
5. Irradiated Food
6. Frozen Food
7. Quiches, casseroles, and chicken pot pie

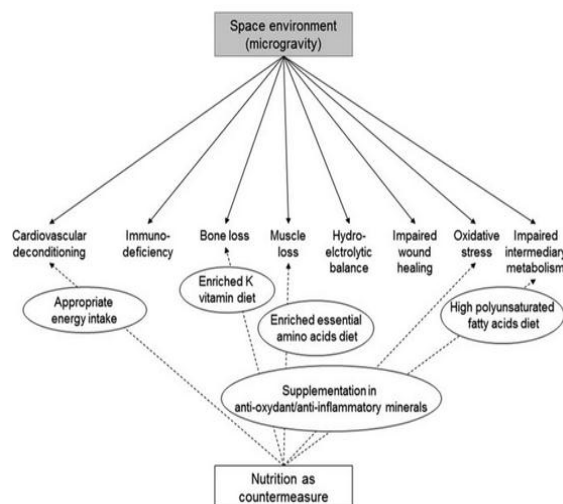
8. Fresh Food
9. Refrigerated Food



فسفات، مصرف ویتامین‌های D و K، قرار گرفتن در مقابل نور ماوراءبنفش و مصرف استروئیدهای آنابولیک و کلسی‌تونین سنتتیک، فلوراید و بیوفسفات‌ها است. مطالعات بیشتر برای فهم دقیق‌تر تغییرات بیوشیمیایی و فیزیولوژیک در حین سفر فضایی و انجام اقدامات متقابل برای حفظ سلامت فضانوردان ضروری است [۱۱، ۴۰].

### نتیجه‌گیری

اندام‌ها و بافت‌های مختلف بدن انسان تکامل خود را در شرایط جاذبه بدست آورده‌اند. در طی سفرهای فضایی کوتاه یا بلند مدت، بدن انسان وارد شرایط میکروگراویتی می‌شود. با ورود به این شرایط تغییرات بیوشیمیایی و فیزیولوژیک در اندام‌ها و بافت‌های مختلف به منظور سازگاری با محیط جدید شروع می‌شود. برخی از این تغییرات می‌تواند بر سلامت و عملکرد صحیح فضانوردان اثرگذار باشد. بنابراین ضروری است قبل، در حین و پس از بازگشت از سفر فضایی اقدامات متقابلی جهت مقابله با آثار این تغییرات بر سلامت فضانوردان انجام پذیرد.



شکل ۷- انواع اقدامات متقابل تغذیه‌ای برای کاهش اثرات جانبی ناشی از کسب سازگاری‌های جدید در طی فضانوردی [۲۶]

موقعیت‌های خوابیده در حین سفر توصیه می‌گردد [۵۵] و مصرف کلریدسدیم و مصرف آب فراوان زمان کوتاهی قبل از بازگشت به سطح زمین به‌منظور جلوگیری از OI توسط فضانوردان انجام می‌شود [۱۱]. اقدامات متقابل برای مقابله با متابولیسم منفی کلسیم و از دست رفتن استخوان شامل انجام ورزش و پیاده‌روی روزانه به‌منظور اعمال فشارهای مکانیکی و فیزیکی به استخوان، مصرف مکمل‌های غذایی حاوی کلسیم و

### References

1. Bostrom N. Existential risks: analyzing human extinction scenarios and related hazards. *Journal of evolution and technology*. 2002; 9:1-30.
2. Powell CS, Martindale D. 20 ways the world could end. *Discover*. 2000; 21(10):50-57.
3. Peara A, Mills E. Global climate change and its implications for life insurance and health organizations. Berkeley, California; January 1999.
4. Manzey D, Schiewe A, Fassbender C. Psychological countermeasures for extended manned spaceflights. *Acta astronautica*. 1995; 35(4-5):339-361.
5. Morpew ME. Psychological and human factors in long duration spaceflight. *McGill Journal of Medicine*. 2001; 6(1):74-80.
6. Smith SM, Zwart SR, Heer M. Human adaptation to spaceflight: the role of nutrition. Lyndon: National Aeronautics and Space Administration; 2014.
7. Carbone, C; Greco, F. Review of microgravity observations at Mt. Etna: a powerful tool to monitor and study active volcanoes. In: Wolf D, Fernández J, editors. Deformation and gravity change: indicators of isostasy, tectonics, volcanism, and climate change. Birkhäuser Basel: Pageoph Topical Volumes; 2007. 769-790.
8. White RJ, Averner M. Humans in space. *Nature*. 2001; 409:1115-1118.

9. Heer M, Santo NG de, Cirillo M, Drummer C. Body mass changes, energy, and protein metabolism in space. *American journal of kidney diseases*. 2001; 38(3):691-695.
10. Noskov VB. Adaptation of water-electrolytes metabolism to space flight and in its imitation. *Fiziologija cheloveka*. 2013; 39(5):119-125.
11. Smith SM, Heer M. Calcium and bone metabolism during space flight. *Nutrition*. 2002; 18(10):849-852.
12. Aubert AE, Larina I, Momken I, Blanc S, White O, Prisk GK, et al. Towards human exploration of space: the THESEUS review series on cardiovascular, respiratory, and renal research priorities. *npj Microgravity*. 2016; 2:1-9.
13. Morey-Holton, E. R. The impact of gravity on life. In: Rothschild LJ, Lister A, editors. *Evolution on planet earth: the impact of the physical environment*. Amsterdam, London: Academic Press; 2003. 143-159.
14. Seibert G. *A World without gravity: research in space for health and industrial processes*. The Netherlands: The European Space Agency; 2001.
15. Gonfalone A. Sleep on manned space flights: zero gravity reduces sleep duration. *Pathophysiology*. 2016; 23(4):259-263.
16. Ingber DE. The architecture of life. *Scientific American*. 1998; 278(1):48-57.
17. Rosengren KS, Brem SK, Margaret Evans E, Sinatra GM. *Evolution challenges: integrating research and practice in teaching and learning about evolution*. New York: Oxford University Press; 2012.
18. Lane HW, Feeback DL. History of nutrition in space flight: overview. *Nutrition*. 2002; 18(10):797-804.
19. Mindell DA, Uebelhart SA, Siddiqi AA, Gerovitch S. *The future of human spaceflight: objectives and policy implications in a global context*. Cambridge: American Academy of Arts and Sciences; 2009.
20. Dick SJ, Launius RD. *Critical issues in the history of spaceflight*. Washington, DC: National Aeronautics and Space Administration; 2006.
21. Ferrando AA, Paddon-Jones D, Wolfe RR. Alterations in protein metabolism during space flight and inactivity. *Nutrition*. 2002; 18(10):837-841.
22. Devlin TM. *Textbook of biochemistry with clinical correlations*. 7th ed. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons; 2010.
23. Hackney KJ, English KL. Protein and essential amino acids to protect musculoskeletal health during spaceflight: evidence of a paradox? *Life*. 2014; 4(3):295-317.
24. Stein TP, Leskiw MJ, Schluter MD, Donaldson, Larina I. Protein kinetics during and after long-duration spaceflight on MIR. *American journal of physiology-endocrinology and metabolism*. 1999; 276(6):E1014-E1021.
25. Lane HW, Gretebeck RJ, Schoeller DA, Davis-Street J, Socki RA, Gibson EK. Comparison of ground-based and space flight energy expenditure and water turnover in middle-aged healthy male US astronauts. *The American journal of clinical nutrition*. 1997; 65(1):4-12.
26. Bergouignan A, Stein TP, Habold C, Coxam V, O'Gorman D, Blanc S. Towards human exploration of space: The THESEUS review series on nutrition and metabolism research priorities. *npj Microgravity*. 2016; 2:1-8.
27. Da Silva MS, Zimmerman PM, Meguid MM, Nandi J, Ohinata K, Xu Y, et al. Anorexia in space and possible etiologies: an overview. *Nutrition*. 2002; 18(10):805-813.
28. Heer M, Paloski WH. Space motion sickness: incidence, etiology, and countermeasures. *Autonomic neuroscience*. 2006; 129(1-2):77-79.
29. Harm DL, Sandoz GR, Stern RM. Changes in gastric myoelectric activity during space flight. *Digestive diseases and sciences*. 2002; 47(8):1737-1745.
30. Amidon GL, DeBrincat GA, Najib N. Effects of gravity on gastric emptying, intestinal transit, and drug absorption. *Journal of clinical pharmacology*. 1991; 31(10):968-973.
31. Lane HW, LeBlanc AD, Putcha L, Whitson PA. Nutrition and human physiological adaptations to space flight. *The American journal of clinical nutrition*. 1993; 58(5):583-588.
32. Hargens AR, Bhattacharya R, Schneider SM. Space physiology VI: exercise, artificial gravity, and countermeasure development for prolonged space flight. *European journal of applied physiology*. 2013; 113(9):2183-2192.
33. Noskov VB. Redistribution of bodily fluids under conditions of microgravity and in microgravity models. *Human physiology*. 2013; 39(7):698-706.
34. Santo NG de, Cirillo M, Kirsch KA, Correale G, Drummer C, Frassl W, et al. Anemia and erythropoietin in space flights. *Seminars in nephrology*. 2005; 25(6):379-387.
35. Norsk P. Cardiovascular and fluid volume control in humans in space. *Current pharmaceutical biotechnology*. 2005; 6(4):325-330.
36. Lane HW, Feeback DL. Water and energy dietary requirements and endocrinology of human space flight. *Nutrition*. 2002; 18(10):820-828.

37. Grigoriev AI, Noskov VB, Larina IM. Post-flight water-salt metabolism in cosmonauts: the long-duration MIR missions. *Acta astronautica*. 2009; 65(5):820-824.
38. Yates BJ, Kerman IA. Post-spaceflight orthostatic intolerance: possible relationship to microgravity-induced plasticity in the vestibular system. *Brain research. Brain research reviews*. 1998; 28(1-2):73-82.
39. Whedon GD, Rambaut PC. Effects of long-duration space flight on calcium metabolism: review of human studies from Skylab to the present. *Acta astronautica*. 2006; 58(2):59-81.
40. Smith SM, McCoy T, Gazda D, Morgan JLL, Heer M, Zwart SR. Space flight calcium: implications for astronaut health, spacecraft operations, and Earth. *Nutrients*. 2012; 4(12):2047-2068.
41. Smith SM, Wastney ME, O'Brien KO, Morukov BV, Larina IM, Abrams SA, et al. Bone markers, calcium metabolism, and calcium kinetics during extended-duration space flight on the mir space station. *Journal of bone and mineral research*. 2005; 20(2):208-218.
42. Caillot-Augusseau A, Lafage-Proust MH, Soler C, Pernod J, Dubois F, Alexandre C. Bone formation and resorption biological markers in cosmonauts during and after a 180-day space flight (Euromir 95). *Clinical chemistry*. 1998; 44(3):578-585.
43. Leach CS, Rambaut PC, Di Ferrante N. Amino aciduria in weightlessness. *Acta astronautica*. 1979; 6(10):1323-1333.
44. Proshchina AE, Krivova YS, Saveliev SC. Pancreas of C57 black mice after long-term space flight (Bion-M1 Space Mission). *Life sciences in space research*. 2015; 7:22-26.
45. Leach CS, Althuler SI, Cintron-Trevino NM. The endocrine and metabolic responses to space flight. *Medicine and science in sports and exercise*. 1983; 15(5):432-440.
46. Strollo F, Riondino G, Harris B, Strollo G, Casarosa E, Mangrossa N, et al. The effect of microgravity on testicular androgen secretion. *Aviation, space, and environmental medicine*. 1998; 69(2):133-136.
47. Ricci G, Esposito R, Catizone A, Galdieri M. Direct effects of microgravity on testicular function: analysis of histological, molecular and physiologic parameters. *Journal of endocrinological investigation*. 2008; 31(3):229-237.
48. Lane HW, Gretebeck RJ, Smith SM. Nutrition, endocrinology, and body composition during space flight. *Nutrition research*. 1998; 18(11):1923-1934.
49. Fitts RH, Trappe SW, Costill DL, Gallagher PM, Creer AC, Colloton PA, et al. Prolonged space flight-induced alterations in the structure and function of human skeletal muscle fibres. *The Journal of physiology*. 2010; 588(Pt 18):3567-3592.
50. Fitts RH, Colloton PA, Trappe SW, Costill DL, Bain JLW, Riley DA. Effects of prolonged space flight on human skeletal muscle enzyme and substrate profiles. *Journal of applied physiology*. 2013; 115(5):667-679.
51. Stein T, Schluter M, Galante A, Soteropoulos P, Toliass P, Grindeland R, et al. Energy metabolism pathways in rat muscle under conditions of simulated microgravity. *The Journal of nutritional biochemistry*. 2002; 13(8):471-478.
52. Stevens L, Sultan KR, Peuker H, Gohlsch B, Mounier Y, Pette D. Time-dependent changes in myosin heavy chain mRNA and protein isoforms in unloaded soleus muscle of rat. *The American journal of physiology*. 1999; 277(6 Pt 1):C1044-C1049.
53. Barratt MR, Pool SL. *Principles of clinical medicine for space flight*. New York: Springer; 2008.
54. Brigos M, Perez-Poch A, Alpiste F, Torner J, Alonso DVG. Parabolic flights with single-engine aerobatic aircraft: flight profile and a computer simulator for its optimization. *Microgravity science and technology*. 2014; 26(4):229-239.
55. Williams D, Kuipers A, Mukai C, Thirsk R. Acclimation during space flight: effects on human physiology. *Canadian medical association journal*. 2009; 180(13):1317-1323.
56. Petersen N, Jaekel P, Rosenberger A, Weber T, Scott J, Castrucci F, et al. Exercise in space: the European Space Agency approach to in-flight exercise countermeasures for long-duration missions on ISS. *Extreme physiology & medicine*. 2016; 5:1-13.
57. Smith SM, Rice BL, Dlouhy H, Zwart, SR. Assessment of nutritional intake during space flight and space flight analogs. *Procedia food science*. 2013; 2:27-34.
58. Perchonok M, Bourland C. NASA food systems: past, present, and future. *Nutrition*. 2002; 18(10):913-920.
59. Casaburri AA, Gardner CA. *Space food and nutrition: an educator's guide with activities in science and mathematics*. Washington, DC: National Aeronautics and Space Administration; 1999. Available from: URL:<http://spacelink.nasa.gov/products>.
60. Ferrando AA, Tipton KD, Bamman MM, Wolfe RR. Resistance exercise maintains skeletal muscle protein synthesis during bed rest. *Journal of applied physiology*. 1997; 82(3):807-810.

## Physiological and biochemical changes in human spaceflights

Ghasemi A<sup>1</sup>,\*Panjehpour M<sup>2</sup>

### Abstract

At the moment, a variety of disasters including climate changes and meteorite fall threaten human society on the earth. So, scientists believe that it is important to explore viable alternative planets in the Solar System to ensure survival of the human civilization. To this end, lots of space exploration missions have been conducted for gaining information about the other parts of the Solar System in the recent years. Astronauts have to confront a lot of challenges in these missions. Long- and short- term spaceflight is associated with physiological and biochemical changes in human body such as changes in body mass, energy balance, water–electrolyte metabolism, calcium and bone metabolism and endocrine system function. These changes which are often in response to adaptation of astronauts' tissues and systems to environmental changes are affected by microgravity of space, stress, nutrition, changes in sleep cycles, temperature, pressure and humidity. This review describes the physiological and biochemical mechanisms involved in the human body responses to the microgravity and life in space for a long time and possible solutions countermeasures in order to avoid the risk of these changes on the health of the astronauts.

**Keywords:** Physiological adaptation, Weightlessness Countermeasures, Spaceflights, Microgravity

1. MSc, School of Pharmaceutical Sciences, Isfahan University of Medical Sciences, Isfahan, Iran

2. Associate Professor, School of Pharmaceutical Sciences, Isfahan University of Medical Sciences, Isfahan, Iran  
(\*Corresponding Author)  
panjehpour@pharm.mui.ac.ir