طب نظامی
پاییز ۱۳۸۰ شماره ۳(۳)
صفحات ۱۳۳-۱۲۵

پزشکی هوایی (قسمت پنجم) : شتاب و تأثیرات بیولوژیک

محمدرضا صفری‌نژاد D.M.

آدرس مکاتبه : دانشگاه علوم‌پزشکی ارتش ـ دپارتمان طب هوا و فضا ـ تهران-ایران

مقدمه

بدن انسان بطور مداوم تحت تأثیر قوه جاذبه زمین است و در محیطی که زندگی می‌کند خود را بنحوی با آن وفق داده است. هواپیماهای جدید قابلیت مانور خیلی بالایی دارند و قادر به پرواز در سرعتهای خیلی بالا هستند و ممکن است در بعضی موارد، مواجه با نیروهای شتاب خیلی بزرگ شوند. در پزشکی هوایی شتاب را معمولاً برحسب مدت زمان و جهت اعمال آن بر روی بدن تقسیم می‌کنند. بنابراین نیروهای شتاب‌دهنده را می‌توان بصورت کوتاه، متوسط و دراز مدت تقسیم کرد.

کوتاه مدت . این نوع شتابها معمولاً در مدت زمان کمتر از یک ثانیه بدن را تحت تأثیر قرار می‌دهند. اثرات این نوع شتابها، بستگی به ساختمانی از بدن دارد که نیروها به آن ساختمان اعمال می‌شوند و روی هم رفته با تغییراتی که در Velocity ایجاد می‌کنند رابطه دارند.

متوسط مدت . این نیروها مدت ۲-۰/۵ ثانیه بدن را تحت تأثیر قرار می‌دهند . این نیروها معمولاً هنگام پریدن از هواپیما (Ejection) حادث می شوند، ولی در هنگام پرتاب سفینه‌ها، فضاپیماها و نشستن بر روی عرشه کشتی نیز ایجاد می‌شوند. تحمل در مقابل این شتاب نه تنها با Velocity ایجاد شده رابطه دارد، بلکه با مدت زمانی که در آن، شتاب به حداکثر می‌رسد و مدت زمانیکه در این میزان حداکثر باقی می‌ماند نیز رابطه دارد.

دراز مدت . این نیروها مدت زمان بیش از دو ثانیه طول می‌کشند و ممکن است گاهاً تا چند دقیقه نیز طول بکشند. این نیروها در مانورهای مختلف هواپیما و هنگام پرتاب فضاپیماها و ورود مجدد آنها به جو زمین ایجاد می‌شوند. اثرات فیزیولوژیک، ناشی از ایجاد اختلال مداوم در بافتها و اعضاء بدن می‌باشند. شتابهایی با این خصوصیت، سبب ایجاد تغییر در جریان خون و مایعات بدن می‌شوند. مقاومت در مقابل با این نوع شتاب، بیشتر با مدت زمانی که شتاب در اوج خود باقی می‌ماند، رابطه دارد. در این قسمت بیشتر از تغییرات فیزیولوژیک ناشی از نیروهای تولید شده توسط شتابهای طولانی مدت بحث خواهد شد.

ملاحظات فیزیکی

برای درک صحیح فیزیولوژی شتاب، آگاهی از اصول‌اولیه مکانیک و نیز بعضی اصطلاحات‌فیزیکی لازم است:Velocity, Speed, Acceleration,

Speed

میزان حرکت یک جسم بدون در نظر گرفتن مسیر حرکت را «سرعت» و یا Speed می‌گویند. سرعت را برحسب میزان تغییر در مسافت بیان می‌کنند و آن را با فرمول زیر می‌توان نشان داد: مشتق توان اول فاصله را سرعت می‌گویند.

$$\text{سرعت} = \frac{ds}{dt} = \frac{\text{فاصله}}{\text{زمان}}$$

در فرمول فوق s فاصله و t زمان می‌باشد.

واحدهای سرعت عبارتند از : متر در ثانیه، مایل در ساعت و گره یا فوت در ثانیه.

Velocity

میزان حرکت و مسیر حرکت یک جسم را با Velocity بیان می‌کنند. بنابراین آن یک کمیت‌برداری است و دامنه و مسیر را برای ما مشخص می‌کند. اگر سرعت یا مسیر حرکت یک شیئی تغییر پیدا کند، Velocity آن شیئی نیز تغییر می‌یابد. Velocity برحسب میزان تغییر فاصله در یک مسیر بخصوص بیان می‌شود. واحدها، همان واحدهای سرعت هستند ولی اینجا به مسیر حرکت در ابعاد سه‌گانه نیز اشاره می‌شود. مسیر حرکت با استفاده از سطح زمین، ساختمان خود هواپیما و یا ترتیب ستون فقرات یک فرد بیان می‌شود.

Acceleration

تغییر Velocity یک شیئی را شتاب یا Acceleration می‌گویند. آن برحسب میزان تغییر Velocity بیان می‌شود و مثل Velocity دارای یک کمیت برداری است. اگر میزان حرکت در یک مسیر مستقیم تغییر یابد، سبب ایجاد شتاب خطی (Linear) می‌گردد، ولی اگر مسیر و جهت حرکت هر دو با هم تغییر یابند، شتاب شعاعی (Radial) ایجاد خواهد شد. مشتق توان دوم فاصله را شتاب می‌گویند و آن را با فرمول زیر نشان می‌دهند: s^2

$$\text{شتاب (a)} = \frac{velocity}{\text{زمان}} = \frac{ds2}{dt2}$$

در فرمول فوق S فاصله و t زمان برای تغییر در Velocity است.

شتاب می‌تواند مقادیر مثبت (افزایش Velocity) و یا مقادیر منفی (کاهش Velocity) داشته باشد. گاهی بجای شتاب منفی از اصطلاح Deceleration استفاده می‌کنند. واحدهای اصلی شتاب m/s^2 یا ft/s^2 هستند. در پزشکی هوایی، شتابهایی که اعمال می‌شوند، اکثرا برحسب مضاربی از شتاب ناشی از قوهٔ جاذبه بیان می‌شوند. شتاب ناشی از قوه جاذبه را، ثابت جاذبه‌ای می‌گویند و آن را با حرف «g» کوچک نشان می‌دهند. میزان یک «g» برابر m/s^2 ۹/۸۱ (ft/s^2 ۳۲/۲) می‌باشد. نسبت یک شتاب اعمال شده به ثبت جاذبه‌ای را با حرف «G» بزرگ نشان می‌دهند،یعنی مقدار G یک شتاب اعمال شده با فرمول زیر بیان می‌شود:

$$G = \text{شتاب اعمال شده} / g$$

بنابراین میزان2G شتاب برابر m/s^2 ۱۹/۶۲ = ۹/۸۱ × ۲ است.

Jolt

میزان تغییر در شتاب را Jolt (تکان) می‌نامند. مشتق توان سوم فاصله را تکان می‌گویند. واحد تکان G/s است. هنگامی که اثرات شتابهای کوتاه مدت بر روی بدن بررسی می‌شوند، تکان اهمیت ویژه‌ای می‌یابد ولی در پروازهای عادی، میزان شروع شتاب نیز از نظر پاسخ انسان در مقابل نیروها، دارای اهمیت زیادی است.

نیرو و حرکت

روابط مابین حرکت و نیرو توسط قوانین سه‌گانه حرکت نیوتن تعریف می‌شوند.

قانون اول نیوتن . قانون اول متذکر می‌شود که یک جسم ساکن، همانطور ساکن باقی خواهد ماند، مگر اینکه نیرویی بر آن اعمال شود و یک جسم در حال حرکت در یک خط مستقیم با یک سرعت ثابت به حرکت خود ادامه خواهد داد مگر اینکه توسط نیرویی از حرکت آن جلوگیری شود. بنابراین یک نیرو می‌تواند در سرعت و جهت حرکت سبب ایجاد تغییر شود، یعنی Velocity تغییر یابد. بنابراین قانون اول نیوتن را اینطور می‌توان بیان کرد که شتاب نتیجه حرکت نیروهاست.

قانون دوم نیوتن . طبق قانون دوم، هرگاه نیرویی به یک جسمی وارد شود، آن جسم شتاب می‌گیرد و میزان این شتاب رابطه مستقیم با میزان نیرو و رابطه معکوس با وزن جسم دارد. قانون دوم را می‌توان با فرمول ریاضی زیر نشان داد:

$$a = \frac{F}{m} \quad \text{یا} \quad F = ma$$

F = نیرو m = وزن جسم a = شتاب

وزن یک جسم صرف‌نظر از میزان شتاب ثابت باقی می‌ماند.

قانون سوم نیوتن . قانون سوم می‌گوید که برای هر عملی یک عکس‌العمل وجود دارد، عکس‌العمل در جهت خلاف عمل و به همان میزان عمل می‌باشد. بنابراین وقتی یک نیرویی به یک جسمی وارد می‌شود، آن جسم در مقابل آن نیرو مقاومت نشان می‌دهد، که به آن نیروی اینرسی (Inertia) می‌گویند. میزان این نیرو برابر نیروی وارد شده و در جهت خلاف آن می‌باشد. به عنوان مثال، وقتی یک هواپیمایی بطرف جلو شتاب می‌گیرد، نیروی اینرسی، خلبان را به طرف عقب و به صندلی وی می‌راند. در هر موردی که یک فرد شتاب پیدا می‌کند، (به استثنای نیروی جاذبه زمین) آن فرد احساس می‌کند که وزنش اضافه شده و خون و اعضاء بدن در مسیر نیروی اینرسی حرکت می‌کنند.

وزن . نیرویی که توده (Mass) یک جسم در حال شتاب اعمال می‌کند، وزن نامیده می‌شود. یک حالت مخصوص موقعی اتفاق می‌افتد که بدن در میدان قوه جاذبه زمین قرار می‌گیرد. در این حالت، وزن (Weight) یک جسمی برابر با توده آن جسم خواهد بود. بنابراین وقتی یک توده یک کیلوگرمی به میزان $9/81\ m/s^2$ شتاب داده می‌شود (ثابت جاذبه‌ای)، وزن آن یک کیلوگرم خواهد بود. به عبارت دیگر، وزن (w) توسط یک توده (m) موقعی ایجاد خواهد شد که آن توده تحت شتاب (a) قرار گیرد.

$$W = m \times \frac{a}{g}$$

به عنوان مثال، یک جسم یک کیلوگرمی وقتی تحت تأثیر نیرویی قرار می‌گیرد که سبب ایجاد یک شتاب $29/43\ m/s^2$ می‌گردد (شتاب به میزان 3G)، وزن آن ۳ کیلوگرم خواهد شد. نیرویی که توسط یک جسم یک کیلوگرمی در تحت شرایط استاندارد جاذبه (یک شتاب $9/80\ 65\ m/s^2$) اعمال می‌شود، نیوتن نامیده می‌شود و علامت آن N است. یعنی تعریف یک نیوتن نیرو همان $1\ kg/s^2$ می‌باشد. واحد نیرو در سیستم فوت/پوند/ثانیه، (ft/lb/sec) پوند نیز است و علامت آن lbf می‌باشد. آن نیرویی است که توسط یک توده یک پوندی تحت شرایط استاندارد جاذبه (یک $32/8\ ft/s^2$) ایجاد می‌شود. لازم به تذکر است که مابین شتاب احساس نیرو (وزن) که توسط قوه جاذبه زمین تولید می‌شود و وزنی که توسط سایر شتابها تولید می‌شود، تفاوت وجود دارد. سایر اشکال شتاب، سبب احساس یک نیرویی خواهد شد که در جهت مخالف تغییر Velocity ایجاد می‌شود.

در مورد قوه جاذبه زمین،هر دو شتاب و احساس وزن، در یک جهت حس می‌شوند و جهت به سوی مرکز زمین است. وقتی در مقابل شتاب ناشی از قوه جاذبه زمین به طور کامل مقاومت ایجاد می‌شود و بدن به طور مستقیم یا غیرمستقیم با سطح زمین تماس پیدا می‌کند، وزن طبیعی تجربه می‌گردد وگرنه اگر به بدن اجازه دهیم که با شتاب $9/81\ m/s^2$ سقوط کند، هیچ وزنی نخواهد داشت. بنابراین، قوه جاذبه زمین از این نظر بی‌همتاست که آن می‌تواند سبب ایجاد شتاب و یا وزن شود و هر دوی آنها در یک زمان قابل ایجاد توسط قوه جاذبه زمین نیستند.

شتابهای طولانی‌مدت در پرواز

تغییرات طولانی‌مدت در Velocity ، سبب ایجاد شتابهای طولانی‌مدت (بیشتر از ۲ ثانیه) نیز می‌شود. این نوع شتابها می‌توانند هم سرعت و هم جهت حرکت پرواز را تغییر دهند.

شتابهای خطی . اگر سرعت بدون جهت حرکت تغییر یابد، شتاب خطی ایجاد خواهد شد. در پروازهای مرسوم، شتابهای خطی طولانی‌مدت بندرت به آن شدتی می‌رسند که سبب ایجاد اختلال در عملکرد انسان شوند، چون اکثر هواپیماهای معمولی، به آن شدت حرکت رو به جلو ندارند که سبب تغییر در Velocityشوند. ولی در مواردیکه هواپیما و یا فضاپیما توسط راکت پرتاب می‌شود و یا نشستن به مین هواپیما از نوع توقفی است، یک همچون شتابهای خطی طولانی مدت می‌توانند ایجاد شوند . شتابهای خطی

طولانی‌مدت و بزرگ، هنگام پرتاب یک فضاپیما و ورود آن به جو زمین اتفاق می‌افتند. شدت یک شتاب خطی را می‌توان با استفاده از مسافتی که در آن تغییر Velocity اتفاق می‌افتدو مدت زمان این تغییر محاسبه کرد.

$$a = \frac{V}{t}$$ فرمول شماره ۱

$$a = \frac{V2}{2s}$$ فرمول شماره ۲

$$a = \frac{2s}{t2}$$ فرمول شماره ۳

a = شتاب v = تغییر Velocity s = فاصله‌ای که در آن v اتفاق می‌افتد t = مدت زمانی که در آن v اتفاق می‌افتد

با استفاده از واحدهای SI و فرض کردن $g = ۱۰\ m/s^2$ ، می‌توان فرمولهای زیر را بیان کرد.

$$V = ۱۰Gt$$ فرمول شماره ۴

$$S = \frac{V2}{20G}$$ فرمول شماره ۵

$$t = \sqrt{\frac{S}{5G}}$$ فرمول شماره ۶

این فرمولها در مواردی که نیروهای فشارنده مدنظر هستند، اهمیت زیادی پیدا می‌کنند. به عنوان مثال، با استفاده از فرمول شماره ۵ ، اگر Velocity و فاصله‌ای که در آن هواپیما متوقف خواهد شد بدانیم، می‌توانیم میزان شتابی را که ایجاد خواهد شد، تخمین بزنیم و یا اینکه می‌توانیم میزان Padding لازم جهت جلوگیری از آسیب ناشی از تحمل G را مشخص سازیم.

شتابهای شعاعی . اگر جهت حرکت تغییر پیدا کند، بدون اینکه سرعت تغییر یابد، شتاب شعاعی ایجاد می‌شود. یک همچون شتابهایی وقتی اتفاق می‌افتند که خط پرواز تغییر می‌یابد، مثل هواپیماهایی که مانور می‌دهند. در هواپیماهای تیز پرواز نظامی، وقتی هواپیما در یک مسیر دایره‌وار پرواز می‌کند، شتابهایی به بزرگی 6-9G برای مدت بیش از چند ثانیه ایجاد می‌شوند. طبق اولین قانون حرکت نیوتن،یک شیئی که در یک مسیر دایره‌ای به حرکت درآورده شده است، تمایل دارد که در یک مسیر مستقیم حرکت نماید و سبب ایجاد یک مماس (Tangent) نسبت به مسیر دایره‌وار خواهد شد. در این حالت، توسط نیرویی که شیئی را از یک مسیر خط مستقیم دور می‌کند، از حرکت تانژانتی جلوگیری به عمل می‌آید. مسیر حرکت مستقیم به طرف دایره است. جلوگیری از حرکت در یک خط مستقیم، سبب تغییر Velocity می‌شود. تغییر Velocity سبب تغییر در جهت حرکت خواهد شد. یک جسمی که در مسیر دایره‌وار حرکت می‌کند، شتاب شعاعی سعی می‌کند که جسم مذبور را به طرف مرکز دایره بکشاند که به آن شتاب رو به مرکز (Centripedal) می‌گویند. شدت این شتاب بستگی به Velocity دایره‌وار آن جسم در مسیر دایره‌وار و شعاع این دایره دارد:

$$a = \frac{v2}{r}$$

a = شتاب شعاعی رو به مرکز v = velocity دایره‌وار

r = شعاع مسیر دایره‌ای

به عنوان مثال، با استفاده از این رابطه می‌توان مسئله زیر را حل کرد. شتاب شعاعی یک هواپیما با سرعت ۵۰۰ مایل در ساعت (۳۲۵ متف در ثانیه)، در حول یک مسیر دایره‌ای به قطر یک مایل چقدر می‌باشد؟ با استفاده از فرمول فوق $۲۰۴\ ft/s^2$ یا $۶۲\ m/s^2$ و یا G ۶/۳ بدست می‌آید. بایستی توجه کرد که تغییرات اندک در سرعت یک جسم، بیشتر از تغییرات اندک در شعاع روی شتاب شعاعی تأثیر می‌گذارد.

نیروهای گریز از مرکز در پرواز . همانطور که ذکر گردید، وقتی یک جسمی در طول محور یک مسیر دایره‌وار حرکت می‌کند، آن جسم به صورت شعاعی به طرف مرکز دایره شتاب پیدا می‌کند. طبق قانون سوم نیوتن، نیرویی که سبب می‌شود جسم یک توده به طرف مرکز یک مسیر دایره‌ای شتاب پیدا کند، بایستی توسط یک نیروی دیگری به حالت تعادل درآید. این نیرو در مسیر عکس عمل می‌کند. این

نیرو،همان نیروی اینرسی است و چون از مرکز دایره به طرف خارج عمل می‌نماید،اصطلاحاً به آن نیروی گریز از مرکز می‌گویند. اثرات فیزیولوژیک شتابهای شعاعی در مسیر دایره‌ای شکل، به علت همین نیروهای گریز از مرکز است. میزان این نیروی گریز از مرکز را می‌توان توسط رابطه زیر حساب کرد:

$$F = \frac{mv2}{r}$$

F = نیروی اینرسی گریز از مرکز m = توده بدن v = velocity دایره‌وار r = شعاع مسیر دایره‌ای

یک شیئی در داخل یک هواپیمایی که مسیر پرواز دایره‌وار دارد،نه تنها در معرض نیروهای اینرسی گریز از مرکز قرار دارد (که توسط شتابهای شعاعی ایجاد می‌شود)، بلکه تحت نیروی ناشی از شتاب خطی که توسط قوه جاذبه زمین ایجاد می‌شود نیز قرار می‌گیرد. رابطه ما بین نیروهای گریز از مرکز و جاذبه زمین در حین مانور مکرراً تغییر می‌یابد. طوریکه شدت و مسیر نیروی منتجه که بر روی شیئی موجود در داخل هواپیما، در طول مسیر پرواز اثر می‌کند، دائم در حال تغییر است.

ترمینولوژی شتاب . وقتی هدف اصلی تأثیر شتاب بر روی انسان است،مسیری را که در آن شتاب یا نیروی اینرسی تأثیر می‌گذارد با استفاده از سیستم محورهای سه‌گانه توصیف می‌شود. محور عمودی را با علامت Z نشان می‌دهند و آن موازی با محور عمودی بدن است. اگر مابین نیروها نیروی شتاب و نیروی اینرسی ناشی از آن تفاوت قائل نشویم، دچار اشتباه بزرگ خواهیم شد. نیروی اینرسی همیشه در جهت عکس نیروی شتاب تأثیر می‌گذارد. یعنی اگر مسیر و جهت شتاب به طرف سر باشد، تمایل دارد که احشاء داخل شکم و چشمها را به طرف پا تغییر مکان دهد و نیروی حاصل از آن را اصطلاحاً G مثبت (+Gz) می‌گویند. در جدول زیر ترمینولوژی پزشکی هوایی استاندارد AGARD ، که مسیرهای شتاب و نیروهای اینرسی را همراه با تأثیرات آنها به بدن را نشان می‌دهد، آورده شده است:

شتاب مثبت طولانی‌مدت (+GZ) . خدمه هواپیماهای تیز پرواز در معرض شتابهای مثبت طولانی مدت می‌باشند. این شتابها، هنگام

ترمینولوژی استاندارد	توصیفهای فیزیولوژیک و رایج	جهت نیروی اینرسی منتجه	جهت شتاب
+Gz	G مثبت، کره چشمها به طرف پایین	از طرف سر به طرف پا	بطرف سر
-Gz	G منفی، کرات چشم به طرف بالا	از طرف پا به طرف سر	بطرف پا
+GX	G قدامی خلفی عرضی، کرات چشم بطرف داخل، G به پشت خوابیده	از طرف قفسه سینه به طرف پشت	بطرف جلو
-GX	G خلفی قدامی عرضی، G خوابیده به شکم، کرات چشم به طرف خارج	از طرف پشت به طرف قفسه سینه	بطرف عقب
+GY	G لاترال چپ، کرات چشم بطرف چپ	از طرف راست بطرف چپ	بطرف راست
+GY	Gلاترال راست، کرات چشم بطرف راست	از طرف چپ به طرف راست	بطرف چپ

تغییر در مسیر پرواز و هنگام چرخیدن و برگشتن از یک حالت شیرجه رفتن می‌باشد. ساختار بسیاری از هواپیماهای جنگنده طوری است که کادر پروازی داخل آنها در معرض شتابهای مثبت ۵–۷G با مدت زمانهای ۴۰–۱۰ ثانیه می‌باشند. نسل جدید هواپیماهای جنگنده، شتابهای ۸–۱۰ G تا ۶۰ ثانیه نیز ایجاد می‌کنند. شتابهای به این بزرگی، در فواصل زمانی خیلی سریع قابل ایجاد شدن هستند، ممکن است میزان شروع ۱۰ G/s باشد. پس از ابداع وسایل و تجهیزات ضد G (anti-G) میزان تحمل انسان، یک فاکتور محدودکننده و در انجام عملیات توسط هواپیماها شد.

تأثیرات عمومی

تحرک . علائم و نشانه‌های ناشی از شتاب، بعلت افزایش وزن کل بدن می‌باشد. این افزایش وزن حتی در شتابهای مثبت اندک نیز

اتفاق می‌افتد. در 2Gz+ بافتهای نرم صورت بطرف پایین کشیده شده و یک افزایش واضح در وزن تنه بدن و اندامها حادث می‌شود. در 2.5G+ بلند شدن از حالت نشسته مشکل و در 3Gz+ غیرممکن است. در شتابهای مثبت بیش از 2-3G ، بدون نیروی کمکی نمی‌توان از هواپیما بیرون پرید. در بالای 3G ، حرکت دادن اندامها مشکل می‌شود و در 8G ، بالا بردن دستها غیرممکن است. حرکات بزرگتر مثل بلند شدن و گرفتن دستگیرهٔ صندلی پر آن رفته رفته مشکل می‌شود و مدت زمان لازم برای انجام این کار در 6G دو برابر 1G می‌شود و در 7G بندرت بتوان این کار را انجام داد. با این همه اگر ساعد و دستها بخوبی حمایت شوند، حرکات کنترلی ظریف و حرکاتی را که نیروی قابل ملاحظه لازم دارند، درصد خطای خیلی اندک در شتابهای تا 8G می‌توان انجام داد. این بشرطی است که هوشیاری آسیب ندیده باشد. حتی بدون کلاه سر، اگر یک فرد اجازه دهد که گردن وی در شتاب بالای 8G بطرف جلو خم شود، نخواهد توانست سر خود را بلند کند. وقتی یک کلاه که وزن آن ۲ کیلوگرم است، پوشیده می‌شود این محدودیت در شتابهای 6Gz+ تا 4+ اتفاق می‌افتد. مرکز جاذبه سر نسبت به محل اتصال آتلانتو-اکسی‌پیتال و فقرات فوقانی توراسیک، دارای اهمیت زیاد است. تجهیزاتی که در سر از آنها استفاده می‌شود، مرکز جاذبه سر را ممکن است بطرف جلو حرکت دهند و این سبب می‌شود که تحت شتابهای Gz+ سر بطرف جلو حرکت کرده و گردن خم شود.

بینایی . قرار گرفتن در معرض شتاب مثبت، قبل از اینکه سبب اختلال در هوشیاری شود، سبب آسیب در بینایی می‌گردد. شتاب 4.5Gz+ دید را به طور کامل از بین می‌برد (Blackout) ، ولی هنوز شنوایی و هوشیاری تغییری پیدا نکرده‌اند. در شتابهای کمتر، قدرت بینایی کاهش می‌یابد. دید محیطی از بین رفته و دید مرکزی هنوز باقی است. به این حالت Grey-Out می‌گویند. میزان شتابی که در آن،یک میزان از دید محیطی از بین می‌رود، خیلی متغیر است. آن از یک شخص به شخص دیگر متفاوت است. آن همچنین با وضعیت بدن،حالت فیزیکی شخص، میزان روشنایی در محیط بینایی و هدف و بویژه با میزان Relaxation فرد فرق می‌کند. در یک آزمایش تجربی، میزان متوسط شتابی که در آن محیط بینایی به اندازه یک مخروط ۴۵ درجه کاهش می‌یابد، ۴/۱G بود (±۰/۷ G) و میزان شتابی که در آن، کوری کامل حادث می‌شد (±۰/۸ G) ۴/۷G بود. میزان شتاب هرقدر که باشد، بینایی تا ۵ ثانیه بعد شروع شتاب تغییر نمی‌یابد. در مقادیر متوسط شتاب، قدرت بینایی اغلب ۱۲-۸ ثانیه پس از شروع شتاب، کاهش می‌یابد. علت این بهبودی، جبران سیستم قلبی‌عروقی است که در آن میزان جریان خون به شبکیه افزایش می‌یابد. بنابراین، هنگام قرارگیری در معرض شتاب 5G ، ممکن است در عرض ۶ ثانیه کوری کامل حادث شود و در عرض ۶ ثانیه بعدی دوباره بینایی برقرار گردد. پس از خاتمه مانور، معمولاً در عرض ۵-۳ ثانیه بینایی برمی‌گردد.

عدم هوشیاری . شتابهای مثبت، قدری بیشتر از شتابی که باعث کوری کامل می‌شود، سبب عدم هوشیاری نیز می‌گردد. در شتابهای متوسط 5-6G ، کوری قبل از عدم هوشیاری حادث می‌شود ولی در شتابهای بالاتر، قبل از هرگونه اختلال بینایی، از بین رفتن هوشیاری اتفاق می‌افتد. اگر شروع شتاب خیلی سریع باشد، فاصله زمانی از قرار گرفتن در معرض شتاب تا از بین رفتن هوشیاری ۶-۴ ثانیه خواهد بود. با از بین رفتن هوشیاری، توان عضلانی به طور کامل از بین رفته و سر و تنه به یکباره پایین می‌افتند. در حالیکه فرد در وضعیت عدم هوشیاری است، تشنج بطور شایع اتفاق می‌افتد. بدست آوردن دوباره هوشیاری پس از خاتمه شتاب، نسبتاً آهسته است. تمام تواناییهای فرد بمدت ۰/۵ ثانیه از بین رفته و به همان میزان نیز حالت کنفوزیون وجود دارد. بعلت فراموشی فیزیولوژیک و مهار سایکولوژیک، حملات عدم هوشیاری ناشی از نیروی G، ممکن است نادیده گرفته شوند و فرد اصلاً متوجه آنها نشود. شتابهای با شدت کم و طولانی مدت، ممکن است بعلت سنکوپ وازوواگال سبب عدم هوشیاری شود. در همچون مواردی تعریق، رنگ پریدگی و برادیکاری وجود دارد. در یک بررسی خلبانان نیروی هوایی آمریکا،متوجه شدند که ۱۲ درصد خلبانان، حداقل یک بار حمله G-Induced Loss of Consciousness را تجربه کرده‌اند. در یک

دوره ۲/۵ ساله، ۷ مورد هواپیما همراه با خدمه بعلت GLOC از بین رفته بودند.

تأثیرات قلبی‌عروقی . تأثیرات شتاب مثبت بر روی بینایی و حالت روانی فرد بعلت کاهش جریان خون به این اعضاءمی‌باشد. قرارگیری در معرض شتاب مثبت، تأثیرات آنی شدیدی بر بستر عروقی وریدی و شریانی دارد و خون بطرف اعضاء Dependent منحرف می‌شود. این اختلالات اولیه، سبب برانگیخته شدن یک عده رفلکسهای جبرانی می‌شود که سعی دارند اختلالات ایجاد شده اولیه را به حداقل برسانند.

تأثیرات هیدرواستاتیک اولیه . نیرویی که توسط یک ستون از مایع تولید می‌شود، با ارتفاع آن ستون و دانسیته مایع و شتابی که در معرض آن قرار دارد، مشخص می‌شود. اگر سایر شرایط ثابت باقی بمانند، میزان فشاری که توسط یک ستون از مایع ایجاد می‌شود، رابطه مستقیم با شتاب دارد. بنابراین، اثر فوری شتاب مثبت، تشدید گرادیانهای فشار است. این گرادیانهای فشار، در حالت طبیعی بعلت قوه جاذبه، در یک فرد ایستاده وجود دارند. هنگام ایستادن از حالت خوابیده به پشت، فشارها در طرف راست و چپ قلب، در شروع قرارگیری در معرض یک فشار مثبت، بدون تغییر باقی می‌مانند. فشار مثبت، وزن ستونهای خون بالا و پایین قلب را افزایش می‌دهد. طوریکه فشارهای عروقی در بالای قلب کاهش و فشارهای عروقی در پایین قلب افزایش می‌یابند. این تغییرات در فشارهای داخل عروقی، اثرات فوری در اندازه عروق خونی دارند. چون اندازه یک رگ بستگی به اختلاف فشار بالینی داخل عروق و فشار بافت خارج عروق،قابلیت اتساع رگ و میزان خون در دسترس برای پر شدن رگ دارد. در عوض، تغییر در اندازه عروق، تأثیرات عمیق در میزان جریان خون موضعی دارد. بنابراین افزایش دادن فشارهای Transmural در شرائین کوچک و آرتریولهای زیر سطح قلب، مقاومت محیطی را کاهش و جریان خون موضعی را افزایش خواهد داد. در صورتیکه کاهش فشارهای ترانس مورال وریدهای بالای سطح قلب، می‌تواند سبب کلاپس کامل عروق و قطع جریان خون در آنها شود. شدت تغییرات فشار ایجاد شده در گردش خون توسط شتاب مثبت، متناسب با فاصله عمودی مابین نقطه‌ای است که فشار اندازه‌گیری می‌شود و قلب و میزان شتاب. فشار شریانی متوسط در قلب در هر دو شتاب 4.6z+ و 1Gz+ ، برابر ۱۰۰ میلی‌متر جیوه است. فشار متوسط در شرائین مغز در سطح چشمها (۳۰ سانتیمتر بالاتر از قلب)، ۱۰۰ میلیمتر جیوه کمتر از فشاری است که توسط یک ستون مایع ۳۰ سانتیمتری ایجاد می‌شود، آن در شتاب 1Gz+ برابر ۲۲mmHg و در شتاب 4.5Gz+ برابر ۹۹mmHg است. یعنی فشار شریانی مغزی متوسط از ۷۸mmHg در 1Gz به ۱mmHg در ۴/۵Gz سقوط می‌کند. فشار در شریان فمورال که تقریباً ۶۰ سانتیمتر در زیر قلب قرار دارد، برابر ۱۴۴ mmHg = ۴۴ + ۱۰۰ در 1Gz می‌باشد. فشار یک ستون ۶۰ سانتیمتری از خون در ۴/۵Gz+ به ۱۹۸mmHg افزایش می‌یابد، طوریکه فشار شریان در این میزان شتاب مثبت، تقریباً ۳۰۰mmHg است. فشار در دهلیز راست قلب در هر دو ۱+ و ۴/۵Gz+ تقریباً برابر فشار آتمسفر است. در 1Gz+ فشار در وریدهای مغز در سطح چشم برابر ۲۰mmHg- می‌باشد. قرار گرفتن در معرض شتاب ۴/۵G+ ، سبب افزایش وزن ستون خون مابین وریدهای مغزی و قلب می‌گردد. آن به میزان ۱۰۰mmHg سبب کاهش فشار در وریدهای مغز می‌شود. فشار ترانس مورال در وریدهای ژوگولر در مواجه با شتاب مثبت بالاتر می‌باشد. آن باعث کاهش قطر مجرای وریدها به مقدار زیاد شده، طوریکه در عمل فشار در بولب ژوگولر در شتاب ۴/۵Gz+ فقط به ۵۰mmHg- سقوط می‌کند. فشار در وریدهای زیر قلب افزایش می‌یابد و علت آن شتاب افزایش وزن ستون خون مابین نقطه موردنظر و دهلیز راست می‌باشد.

تغییرات گردش‌خون ثانویه . اگرچه هنگام قرار گرفتن در معرض شتاب مثبت، فشار شریانی در سطح قلب تغییر نمی‌یابد، این فشار در ۱۲-۶ ثانیه بعدی بتدریج کاهش می‌یابد، علت سقوط در فشار شریانی متوسط، کاهش مقاومت محیطی و کاهش برون‌ده طرف چپ قلب می‌باشد. علت کاهش مقاومت محیطی، افزایش شدید فشارهای ترانس‌مورال در آرتریولهای اعضاء Dependent است، در حالیکه افزایش در فشار وریدی در نواحی زیر قلب، ناشی از ظرفیت

قابلیت اتساع عروق و بنابراین کاهش موقتی جریان خون به طرف عقب و به طرف دهلیز راست قلب می‌باشد. اگر شتاب مثبت همچنان باقی بماند، این سقوط پیشرونده فشار در سرتاسر درخت شریانی تا ۱۲-۶ ثانیه پس از شروع شتاب باقی می‌ماند. پس از آن، بعلت رفلکسهای جبرانی، قضیه عکس شده و جریان خون وریدی برگشتی به قلب افزایش می‌یابد. چون عروق اندام تحتانی بدن پر از خون شده‌اند. رفلکسهای جبرانی در پاسخ به سقوط فشار در سینوس کاروتید برانگیخته می‌شوند. سقوط فشار ترانس‌مورال در سینوس کاروتید، فعالیت گیرنده‌های فشاری کاروتید را کاهش داده و بطور رفلکسی منجر به انقباض ژنرالیزه آرتریولها و تاکیکاردی می‌شود. قرار گرفتن در معرض شتاب ۴Gz+ ، سبب حداکثر ضربان قلب، یعنی ۱۴۰-۱۲۰ در دقیقه می‌شود. ده تا پانزده ثانیه پس از شروع قرارگیری در معرض شتاب مثبت، برگشت وریدی به سمت راست قلب شروع به افزایش یافتن می‌کند و برون‌ده سمت چپ قلب نیز افزایش می‌یابد. در ۴۰-۲۰ ثانیه بعدی، برگشت وریدی و برون‌ده قلب، همچنان افزایش می‌یابند، ولی آنها هرگز میزان جریان خون قبل از قرارگیری در معرض شتاب مثبت را نمی‌توانند ابقاء کنند. چون قسمت قابل ملاحظه‌ای از خون مرکزی بدن تا مدت زمانیکه شتاب ادامه دارد،در اندام تحتانی بدن باقی می‌ماند. برون‌ده قلب پس از ۶۰-۳۰ ثانیه قرارگیری در معرض شتاب ۴Gz+ در حدود ۲۰ درصد زیر شرایط استراحت سقوط می‌کند. تمام این تغییرات جبرانی، سعی دارند فشارخون شریانی را ابقاء نمایند، طوریکه ۶۰-۴۰ ثانیه پس از قرارگیری در معرض یک شتاب مثبت با میزان متوسط ۵G-۳، فشارخون شریانی متوسط در سطح قلب، خیلی شبیه به حالت قبل از قرار گرفتن در معرض شتاب مثبت می‌شود. تجمع خون ناشی از شتاب مثبت، بیشتر در اندامهای تحتانی است. تجمع خون اندکی در عروق ذخیره داخل شکم اتفاق می‌افتد. چون هنگام شتاب مثبت فشار داخلی شکمی به موازات فشار داخل وریدی افزایش می‌یابد. در یک فرد در حالت نشسته، در شتاب 4Gz+ مقدار ۶۰ تا ۱۰۰ میلی‌لیتر خون در اندام تحتانی تجمع می‌یابد ولی همین فرد اگر بایستد، در شتاب ۱Gz+ ، این مقدار به ۳۰۰ تا ۸۰۰ میلی‌لیتر می‌رسد. افزایش فشار در مویرگهای اندام تحتانی، سبب ترانسوداسیون مایع از خون به داخل بافتها می‌شود، طوریکه به طور پیشرونده حجم مایع داخل رگها رو به کاهش می‌گذارد. این میزان از دست دادن مایع اگر فردی به طور مداوم در معرض شتاب ۴Gz+ باشد، ۲۰۰ میلی‌لیتر در دقیقه است. این از دست دادن وسیع مایع سرانجام منجر به سنکوپ وازواگال و افت ناگهانی فشارخون شریانی خواهد شد. علت کاهش فشار خون،اتساع عروقی شدید محیطی و برادیکاردی می‌باشد.

گردش خون مغز . اثرات هیدرواستاتیک شتابهای مثبت بزرگتر از ۴G-۳/۵ سبب کاهش فشار شریانی در مغز می‌شود. در شتاب ۱Gz+ میزان جریان خون کفاف فونکسیون طبیعی را نمی‌کند و در ۴/۵G+ ، فشار شریانی در سر تقریباً به صفر می‌رسد. علاوه از آن، فشار شریانی وقتی به کمتر از ۲۰mmHg می‌رسد، کوری کامل حادث می‌شود ولی هنوز هوشیاری برقرار است. اگرچه ۱۲-۶ ثانیه پس از شروع شتاب، فشار شریانی در مغز تا حدودی بعلت رفلکسهای جبرانی، ابقاء می‌شود ولی میزان شیوع عدم هوشیاری خیلی کمتر از آن چیزی است که ما انتظار داریم. در شتابهای ۵Gz+ تا ۳+، اگرچه فشار شریانی در سر ۲۰mmHg-۰ می‌باشد، ولی چند مکانیزم هستند که سبب ابقاء جریان خون کافی به مغز می‌شوند. اولاً عروق کورتکس و مغز در یک جعبه استخوانی سفت قرار دارند و توسط مایع CSF احاطه شده‌اند و ثانیاً به علت اثرات فشار هیدرواستاتیک، فشار CSF به موازات فشار عروق کاهش می‌یابد، طوریکه اختلاف فشار از ورای جدار عروق داخل جمجمه، تقریباً در حد طبیعی باقی می‌ماند و علیرغم کاهش فشار داخل عروقی،عروق داخل مغز باز باقی می‌مانند. ثانیاً عروق کورتکس مغز به طور فعال دچار انبساط می‌شوند، طوریکه مقاومت در مقابل جریان خون در آنها کاهش می‌یابد. ثالثاً ستون خون در قسمت فوقانی وریدهای گردنی، یک اثر شبیه سیفون ایجاد می‌کند و تا زمانی که این ستون خون باقی است، گردش خون مغز نیز ابقاءمی‌شود. بنابراین، در یک شتاب مثبت ۵G-۴ و با یک فشار منفی ۵۰mmHg- در بولب ژوگولر یک اختلاف فشار ۵۰ تا ۶۰ میلیمتر جیوه مابین گردش خون وریدی و شریانی مغز ابقاء می‌شود.

با این همه در شتابهای بزرگتر،کاهش بیشتر فشار در داخل قسمت فوقانی وریدهای ژوگولر سبب می‌شود که این عروق به طور کامل کلاپس پیدا کرده و سیفون از بین برود. در این حالت، خون مغز را ترک کرده و در عرض ۴-۳ ثانیه عدم هوشیاری حادث می‌شود. با از بین رفتن سیفون، عروق مغز خالی از خون می‌شوند، طوریکه اکسیژنی که به صورت محلول در داخل بافت مغز وجود دارد، متابولیسم هوازی را ادامه می‌دهد. این ذخیره نیز در عرض ۳ ثانیه تمام می‌شود.

گردش خون شبکیه . اختلالات بینایی ناشی از شتاب مثبت، ناشی از ایسکمی شبکیه هستند. کاهش دید محیطی به علت کاهش جریان خون به شبکیه است. قطع کامل جریان خون، منجر به کوری می‌شود. فشار داخل چشم ۲۰mmHg است، یعنی برای اینکه خون در داخل شریان مرکزی شبکیه جریان پیدا کند، فشار داخل این رگ بایستی کمتر از ۲۰mmHg نباشد. وقتی در حین یک شتاب مثبت، فشار خون شریانی به کمتر از ۲۰mmHg سقوط می‌کند، کوری (Blackout) حادث می‌شود. وقتی فشار شریانی کمتر از ۲۰mmHg است، با افتالموسکوپ می‌توان شرائین و آرتریولهای خالی را در شبکیه دید. مابین سقوط فشار شریانی به کمتر از ۲۰mmHg و از بین رفتن بینایی ۶-۴ ثانیه فاصله وجود دارد. این تأخیر به علت مقدار اندکی اکسیژن است که در مایع خارج عروقی شبکیه به صورت حل شده وجود دارد. به همین ترتیب، وقتی دوباره فشار شریانی به بیش از ۲۰mmHg افزایش می‌یابد، تا به دست آوردن دوباره بینایی یک مدت زمانی تأخیری وقت لازم است. این تأخیر به علت زمان لازم برای برقراری دوباره ذخیره اکسیژن در شبکیه و بالا رفتن فشار اکسیژن به میزان موردنیاز متابولیسم شبکیه می‌باشد. علیرغم کوری،هوشیاری هنوز باقی است تا اینکه فشار شریانی در مغز به ۱۰mmHg-۰ برسد.

مویرگهای پوست . در شتابهای مثبت،اختلاف فشار از ورای جدار مویرگهای پوست در اندام تحتانی بالا می‌رود،این سبب ترانسوداسیون مایع به خارج از رگ و پارگی عروق می‌شود. پارگی عروق نیز سبب پتشی (Petechiae) می‌گردد. بنابراین،پس از قرار گرفتن مکرر یا طولانی مدت در معرض شتابهای مثبت بالاتر از 4G ، یافتن خونریزیهای پشتی‌مانند در پاهاو ساعد،زیاد غیرمعمول نیست.

آریتمی‌های قلبی . قرار گرفتن مداوم در معرض شتابهای مثبت +Gz اکثراً سبب آریتمی‌های قلبی خوش‌خیم می‌شود. شایع‌ترین آنها PVCs است ولی PACs، آریتمی سینوسی با یا بدون بلوک جانکشنال و بلوک سینوآتریال نیز دیده می‌شوند. علت این آریتمی‌ها،احتمالاً تغییرات عمیق در تعداد ضربان قلب بدنبال قرار گرفتن در معرض شتاب می‌باشد. با این همه بررسیهای تجربی که در آن انسان را در معرض شتاب +Gz قرار داده‌اند، اختلالات ریتم پاتولوژیک مشاهده نکرده‌اند.