طب نظامی
پاییز و زمستان ۱۳۷۸ شماره ۱(۱ و ۲)
صفحات ۳۳-۲۱

پزشکی هوایی

قسمت اول

گردآورنده : محمدرضا صفری‌نژاد، M.D.
آدرس مکاتبه : دانشگاه علوم‌پزشکی ارتش - بیمارستان نیروی هوایی

مقدمه

پزشکی هوایی (Aviation Medicine) یک شاخه‌ای از طب کار می‌باشد که در آن سعی می‌شود انسان با محیط خطرناک هوا، تطابق داده شود. در ابتدا آن یک شاخه کوچکی از طب بود و بیشتر پزشکان نظامی که علاقه‌ای به فیزیولوژی داشتند، در این رشته کار می‌کردند. با پیشرفت مسافرتهای هوایی، گسترش هواپیماهای نظامی و غیرنظامی، این رشته به خودی خود بصورت یک رشته اختصاصی در پزشکی در آمد.

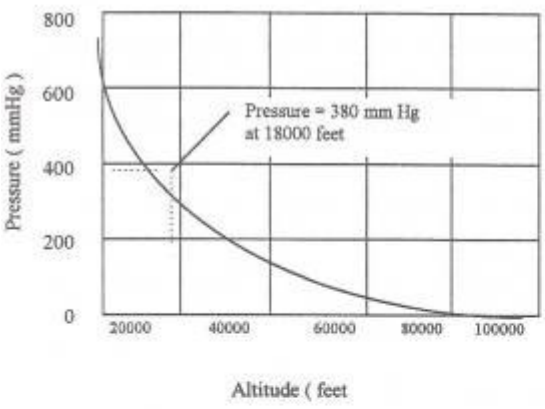
در سلسله بحثهایی که تحت عنوان پزشکی هوایی، در مجله طب نظامی به چاپ خواهد رسید، سعی خواهد شد که پزشکان و کادر پرستاری پروازی با اصول اولیه فیزیولوژی هوایی، در پزشکی هوایی آشنا گردند.

اتمسفر زمین

اتمسفر از سطح زمین تا فاصله‌ای از آن امتداد می‌یابد، این فاصله توسط دو فاکتور مختلف یکدیگر مشخص می‌شود: تشعشع حرارتی از خورشید و قوه جاذبه که توسط زمین اعمال می‌شود. تشعشع حرارتی خورشید سبب می‌شود که گازها انساع پیدا کنند، ولی قوه جاذبه زمین، تمایل دارد که گازها را منقبض ساخته و آنها را به سوی سطح زمین بکشد. بنابراین، دانسیته اتمسفر (اندازه به ازای هر واحد حجم) و فشاری (نیرو به ازای هر واحد سطح) که توسط آن اعمال می‌شود، هر قدر از سطح زمین بطرف فضا حرکت کنیم، بطور پیشرونده‌ای کاهش می‌یابند. چون گاز قابلیت فشردگی دارد، با افزایش ارتفاع از سطح زمین، هم دانسیته و هم فشار کاهش می‌یابند. این کاهش تقریباً بصورت خطی است، ولی تغییرات دما در ارتفاعات مختلف می‌تواند اندک تغییراتی در این کاهش خطی ایجاد کند.

فشاری که در سطح دریا توسط وزن اتمسفر اعمال می‌شود (101.3 Kpa) ۱٤/۷ lb/in^2 می‌باشد. این فشار اتمسفر یک، برابر با فشار یک ستون از جیوه در یک لوله خلاء به ارتفاع ۷۶۰ mm است (کیلوپاسکال = Kpa ، اینچ = in و پوند = lb).

همانطوری که در شکل ۱ ملاحظه می‌شود، این فشار در ارتفاع ۱۸ هزار پایی، نصف شده و به ۳۸۰ میلیمتر جیوه می‌رسد و در ارتفاع ۳۳۷۰۰ پایی، به یک چهارم یعنی ۱۹۰ mmHg کاهش می‌یابد. در ارتفاع صدهزار پایی، فشار اتمسفر یک، یک صدم آن در سطح دریاست.



شکل ۱. رابطه مابین فشار اتمسفر و ارتفاع

در ارتفاع ۲۶۲ هزار پایی (۵۰ مایل، ۸۰ کیلومتر) (Von Karman Line) تصادم ملکولهای داخل اتمسفر آنقدر اندک خواهد بود که نیروهای آئرودینامیک (Aerodynamic) بدون تأثیر خواهند بود. در ارتفاعات بالاتر، بعضی از ذرات سبک‌تر که دارای سرعتهای بالا هستند، از قوه جاذبه زمین فرار کرده و بطرف فضا حرکت می‌کنند، ارتفاعی که این حادثه اتفاق می‌افتد، حد فوقانی اتمسفر است و بعد از آن فضای حقیقی شروع می‌شود. ارتفاع فرار ذرات (Escape Level) ، حدود ٤۳۵ مایلی (۷۰۰ کیلومتر)، از سطح زمین است. ناحیه انتقالی بالای این

ارتفاع که در آن اتمسفر نازک شده و تبدیل به یک فضایی با خلاء کامل می‌شود را Exosphere می‌گویند. حتی در این ارتفاع تأثیر نیروی جاذبه زمین باز قابل توجه است و تا ارتفاع به ۱۷۰۰ مایل (۲۷۳۵ کیلومتر) نرسیده است، نیروی جاذبه، هنوز نصف آن در سطح زمین است.

درجه حرارت

حرارت اتمسفر، با ارتفاع رابطه دارد. علاوه از آن برای هر ارتفاع بخصوص بسته به منطقه جغرافیایی آن، تغییراتی در درجه حرارت وجود دارد. زمین و اتمسفر آن توسط خورشید گرم می‌شوند، ولی در این فرایند، چندین مکانیسم مختلف دخیل هستند. مقداری از تشعشع خورشیدی، توسط خارجی‌ترین لایه‌های اتمسفر، بطرف فضا برگردانده می‌شود و قدری نیز در لایه‌های فوقانی جذب می‌شود. ولی قسمت اعظم اشعه مادون قرمز خورشید، در اتمسفر نفوذ کرده و به سطح زمین می‌رسد. زمین که گرم شد، بلافاصله هوای اطراف خود را نیز گرم می‌کند. قسمت اعظم این گرم شدن توسط رادیاسیون است ولی مقداری نیز توسط هدایت (Conduction) صورت می‌گیرد. این رادیاسیون باز در طیف مادون قرمز می‌باشد، ولی در فرکانسهای (طول موجهای) مختلف است. در لایه‌های پایینی اتمسفر، این رادیاسیون توسط دی‌اکسیدکربن (CO_2) و بخار آب جذب می‌شود، ولی باز قسمتی از این انرژی مادون قرمز، دوباره توسط لایه‌های پایین، رادیاسیون پیدا می‌کند. اثر روی هم رفته این فرایندها، این است که سطح زمین بیشتر از آن مقداری گرم است که می‌بایست باشد. یعنی اگر سطح زمین نور خورشید را مستقیم و در غیاب اتمسفر دریافت می‌کرد، این قدر گرم نمی‌شد. به این پدیده گلخانه‌ای (Greenhouse Effect) می‌گویند.

گرم شدن سطح زمین، سبب جریانات Convection در لایه‌های تحتانی اتمسفر شده و این یک نقش کلیدی در آب و هوای همان منطقه دارد. درجه حرارت لایه‌های تحتانی که بیشتر توسط رادیاسیون مادون قرمز از سطح زمین گرم می‌شوند، در حالت طبیعی با افزایش ارتفاع، بطور پیشرونده‌ای کاهش می‌یابد. ولی این افت درجه حرارت در بالای ۶۰ هزار پا در خط استوا (۲ هزار پا در قطبین) متوقف شده و برعکس می‌شود. علت آن گرمایی است که توسط Ozonosphere تولید می‌شود و وارونگی ناشی از آن، Convection را مهار کرده، طوریکه "آب و هوا" یک پدیده‌ای است که فقط در ارتفاعات پایین‌تر وجود دارد. در بالای Ozonosphere یک ناحیه‌ای است که در آن پدیده سرد شدن غلبه می‌کند، در حالیکه یک مقدار دیگر بالاتر از آن از سطح زمین برویم، بالای ارتفاع حدود ۵۰ مایلی، درجه حرارت دوباره افزایش می‌یابد. علی‌رغم این افزایش پیشرونده درجه حرارت، آن اثر حرارتی قابل ملاحظه‌ای ندارد. چون تراکم ذرات خیلی اندک است. با اینهمه، در این ناحیه که ترکیبی از هوای با تراکم خیلی اندک و رادیاسیون ماورای بنفش شدید است، تمامی گازها بشکل اتمهای باردار شده ظاهر می‌شوند و یک غلظت نسبتاً بالایی از الکترونهای آزاد، وجود دارد.

رادیاسیون یونیزه‌کننده. زمین بطور مداوم، توسط ذرات اولیه تحت اتمی پُرانرژی بمباران می‌شود. این ذرات شامل پروتونها (حدود ۷۹ درصد)، ذرات آلفا (هسته هلیوم) ۲۰ درصد و هسته اتمهای سنگین‌تر (۱ درصد) می‌باشند. این مواد هم از خورشید (رادیاسیون کیهانی خورشید) و هم از سایر ستارگان (رادیاسیون کیهانی راه شیری) منشأ می‌گیرند. این ذرات با یک سرعت بالا وارد اتمسفر می‌شوند، سرعت آنها بسرعت نور می‌رسد. با ورود رادیاسیون یونیزه‌کننده به نواحی فوقانی اتمسفر، ذرات اولیه با اتمهای داخل اتمسفر تصادم پیدا کرده و یک رادیاسیون ثانویه‌ای از پروتونها، الکترونها، نوترونها، مزونها و اشعه گاما ایجاد می‌شود. این تصادم در ارتفاعی مابین ۶۰-۱۲۰ هزار پایی اتفاق می‌افتد. یک همچون رادیاسیون ثانویه‌ای انرژی کمتری دارد ولی توانایی یونیزاسیون شدید دارد. اشعه‌های ثانویه، نواحی پایین‌تر اتمسفر را سوراخ می‌کنند و اگرچه مقداری از آن نیز به سطح زمین می‌رسد ولی قدرت یونیزه‌کننده آنها در ارتفاع زیر ۵۰ هزارپایی بسرعت کاهش می‌یابد. علت آن تصادم بیشتر ملکولهای اتمسفر است. در سطح دریا، اثر یونیزه‌کننده رادیاسیون کیهانی، حدود یک هفتادم آن در ارتفاع ۷۰ هزار پایی است.

ترکیب اتمسفر

ترکیب اتمسفر، بطور قابل ملاحظه‌ای مابین سطح دریا و ارتفاع حدود ۳۰۰ هزارپایی ثابت است. هوا ترکیبی از نیتروژن، اکسیژن و آرگون است که در آن مقدار اندکی CO_2 و سایر گازهای نادر مثل نئون و هلیوم وجود دارد (جدول ۱).

گاهی ترکیب هوا در نزدیکی سطح زمین توسط فراورده‌های انسان تغییر می‌یابد و قدری متفاوت از آن چیزی است که در جدول ذکر شده است. گاهی در نزدیکی برخی کارخانجات میزان CO_2 افزایش می‌یابد. لایه‌های پایین‌تر اتمسفر، تا حدود ارتفاع ۳۰ هزارپایی، ممکن است مقدار قابل ملاحظه‌ای از بخار آب را داشته باشند. غلظت آب موجود در یک تودهٔ مشخص از هوا به مقدار زیادی بستگی به محل و

جدول ۱. ترکیب اتمسفر

Gas	Concentration in Dry Air (% by Volume)
Nitrogen	78.09
Oxigen	20.95
Argon	0.93
Carbon Dioxide	0.03
Neon	1.82×10^{-3}
Helium	5.24×10^{-4}
Krypton	1.14×10^{-4}
Hydrogen	5.00×10^{-5}
Xenon	8.70×10^{-6}

درجه حرارت دارد. هر قدر درجه حرارت یک توده از هوا بیشتر باشد، ظرفیت آن برای پذیرش بخار آب، بیشتر خواهد بود. علی‌رغم مطالب فوق، در عمل هوا مخلوطی از ۲۱ درصد اکسیژن و ۷۹ درصد نیتروژن تعریف می‌شود.

OZONE . اوزون شکل سه اتمی اکسیژن (O_3) است و یکی از اجزاء مهم دیگر اتمسفر می‌باشد. آن در ارتفاع مابین ۱۴۰-۴۰ هزارپایی در غلظتهای قابل ملاحظه‌ای وجود دارد. آن یک گاز آبی رنگ و ناپایدار است و توسط رادیاسیون اکسیژن ملکولی در قسمت فوقانی اتمسفر، توسط امواج کوتاه (۲۰۰ nm) نور ماوراء بنفش خورشید تولید می‌شود. رادیاسیون ماوراء بنفش جذب می‌شود و ملکولهای اکسیژن به اتمهایی آزاد شکافته می‌شوند. این اتمهای آزاد اکسیژن می‌توانند با هم ترکیب شده و یک ملکول اکسیژن مجدد و یا اوزون تولید نمایند. بنابراین، میزان اوزونی که در یک ارتفاع مشخص تشکیل می‌شود بستگی به غلظت ملکولهای اکسیژن موجود و رادیاسیون ماوراء بنفش دارد. در ارتفاع بالاتر از ۳۵۰۰۰۰ پایی، میزان رادیاسیون ماوراء بنفش آنقدر شدید است که تمامی ملکولهای اکسیژن تجزیه می‌شوند ولی پایین‌تر از ارتفاع فوق، ملکولهای اکسیژن فراوان و شدت رادیاسیون ماوراء بنفش کمتر است. طوریکه شرایط برای ایجاد اوزون مهیا می‌باشد. یعنی هر قدر ارتفاع کمتر می‌شود، غلظت اوزون افزایش می‌یابد، تا اینکه ارتفاع به ۱۴۰ هزارپایی برسد، در ارتفاع ۱۰۰ هزارپایی، غلظت اوزون ۱۰ ppmv می‌باشد (Parts Per Million by Volume = ppmv) . در زیر یکصدهزار پایی، شدت رادیاسیون ماوراء بنفش خیلی کم شده و در ارتفاع زیر ۴۰ هزارپایی غلظت اوزون به ۱ ppmv می‌رسد.

تشکیل و تخریب اوزون در اتمسفر، دارای یک نقش فیزیکی و بیولوژیک مهم است. اوزون در لایه‌های فوقانی اتمسفر، نور ماوراء بنفش با طول موج مابین ۳۰۰-۲۰۰ نانومتر

جدول ۲. اتمسفر استاندارد بین‌المللی (ICAO)

Altitude		Pressure		Temperature
ft	m	mmHg	lb/in2	oc
0	0	760	14.70	+15.0
1000	305	733	14.17	+13.0
2000	610	706	13.67	+11.0
3000	914	681	13.17	+9.1
4000	1219	656	12.69	+7.0
5000	1225	632	12.23	+5.1
6000	1829	609	11.78	+3.1
7000	2134	586	11.34	+1.1
8000	2438	565	10.92	-0.9
9000	2743	543	10.50	-2.8
10000	3048	523	10.11	-4.8
11000	3353	503	9.72	-6.8
12000	3658	483	9.35	-8.8
13000	3962	465	8.98	-10.8
14000	4267	447	8.63	-12.7
15000	4572	429	8.29	-14.7
16000	4879	412	7.97	-16.7
17000	5182	395	7.64	-18.7
18000	5486	380	7.34	-20.7
19000	5791	364	7.04	-22.6
20000	6096	349	6.75	-24.6
21000	6401	3335	6.48	-26.6
22000	6706	321	6.21	-28.6
23000	7010	307	5.95	-30.6
24000	7315	294	5.70	-32.6
25000	7620	282	5.45	-34.5
26000	7925	270	5.22	-36.5
27000	8230	258	4.99	-38.5
28000	8534	247	4.78	-40.5
29000	8839	236	4.57	-42.5
30000	9144	226	4.36	-44.4
31000	9449	215	4.17	-46.4
32000	9754	206	3.98	-48.4
33000	10058	196	3.80	-50.6
34000	10363	187	3.63	-52.4
35000	10668	179	3.46	-54.2
36000	10973	170	3.30	-56.3
37000	11278	162	3.14	-56.5
38000	11582	155	3.00	-56.5
39000	11887	147	2.95	-56.5
40000	12192	141	2.72	-56.5
41000	12497	134	2.59	-56.5
42000	12802	128	2.47	-56.5
43000	13107	122	2.36	-56.5
44000	13411	116	2.24	-56.5
45000	13716	111	2.14	-56.5
46000	14021	106	2.04	-56.5
47000	14326	101	1.95	-56.5
48000	14630	96.0	1.85	-56.5
49000	14935	91.5	1.77	-56.5
50000	15240	87.3	1.68	-56.5
51000	15545	83.2	1.61	-56.5
52000	15850	79.3	1.53	-56.5
53000	16155	75.6	1.46	-56.5
54000	16459	72.1	1.39	-56.5
55000	16764	68.8	1.32	-56.5
56000	17069	65.5	1.27	-56.5
57000	17374	62.4	1.21	-56.5
58000	17679	59.5	1.15	-56.5
59000	17983	56.8	1.10	-56.5
65000	18288	54.1	1.04	-56.5
70000	19812	42.3	0.828	-56.5
75000	21336	33.3	0.644	-55.2
80000	22860	26.2	0.507	-53.6
85000	24384	20.7	0.401	-52.1
90000	25908	16.4	0.317	-50.6
95000	27432	13.0	0.251	-49.1
6000	28956	10.3	0.199	-47.5
100..000	30480	8.2	0.158	-46.0

را جذب می‌کند و از رسیدن این طول موج مضر اشعه ماوراء بنفش به سطح زمین جلوگیری می‌کند. علاوه از آن تخریب مداوم اوزون موجود در همان ناحیه، موجب آزاد شدن حرارت می‌گردد و این باعث می‌شود که هر قدر از ارتفاع ۷۰ هزار پایی به ارتفاع ۱۶۰ هزار پایی صعود می‌کنیم، درجه حرارت افزایش یابد.

اوزون بخودی خود یک گاز فوق‌العاده سمی است و تأثیرات بالینی آن بیشتر بر روی دستگاه تنفس می‌باشد. قرار گرفتن ناگهانی در معرض غلظتهای ppmv ۰/۸-۰/۶ به مدت دو ساعت، سبب کاهش ظرفیت حیاتی و FEV و کاهش قدرت دیفوزیون CO در ریه‌ها می‌شود. غلظت ppmv ۱۰ از این گاز سبب ادم ریه می‌شود. علاوه از آن، اوزون سبب آسیب به قدرت بینایی در شب شده و اگر سلولها را با آن کشت دهند سبب شکستگی در کروماتید می‌شود.

ساختمان اتمسفر

در حالت طبیعی، اتمسفر مرکب از چند لایه متحدالمرکز فرض می‌شود، که هر لایه آن دارای خصوصیات مربوط به خودش است. یکی از باارزش‌ترین روشها، برای تقسیم‌بندی لایه‌های اتمسفر استفاده از خصوصیات حرارتی هر لایه می‌باشد. لایه‌های اتمسفر از سطح بطرف بالا عبارتند از: Troposphere ، Stratosphere ، Mesosphere ، Thermosphere و Exosphere . لایه خارجی هر Sphere را "Pause" می‌نامند، مثلاً لایه Troposphere را Tropopause و لایه Stratosphere را Stratopause می‌گویند. در شکل ۲ رابطه درجه حرارت با ارتفاع در نواحی مختلف اتمسفر آورده شده است.

Troposphere . یکی از خصوصیات این لایه این است که با افزایش ارتفاع، درجه حرارت بطور نسبتاً ثابتی سقوط می‌کند. از خصوصیات دیگر این لایه وجود بخار آب و تلاطم هوا به مقدار زیاد (Weather) می‌باشد. سقوط درجه حرارت با افزایش ارتفاع را میزان زایل شدن حرارت (Temperature Lapse-Rate) می‌نامند و به مقدار زیادی بستگی به حالات ناحیه‌ای دارد. میزان متوسط زایل شدن درجه حرارت در هوای راکد، حدود ۲ درجه سانتیگراد به ازای هر ۱۰۰۰ پا می‌باشد. کاهش درجه حرارت در Tropopause متوقف می‌شود. ارتفاع آن بسته به عرض جغرافیایی و فصل و سال متفاوت است. چون شدت انرژی خورشیدی که به سطح زمین می‌رسد، در خط استوا بیشتر از قطبها می‌باشد، هوا در خط استوا گرمتر است و افزایش درجه حرارت نیز بیشتر از قطبین خواهد بود. بنابراین ارتفاع تروپوپوز از ۵۸ هزار پا در استوا تا ۲۶ هزار پا در قطبین متفاوت است. بنابراین گرادیان حرارتی در تروپوسفر از ۱۵ درجه سانتیگراد در سطح دریا تا $-83^{\circ}C$ در استوا و حدود $-53^{\circ}C$ در قطبین متفاوت است. این گرادیان حرارتی است که سبب ایجاد پدیده آب و هوا می‌شود، پدیده‌ای که محدود به تروپوسفر است.

Stratosphere . از خصوصیات این لایه، یک درجه حرارت نسبتاً یک شکل و فقدان تقریباً کامل بخار آب است. آن از تروپوپوز تا ارتفاع حدود ۱۵۸ هزار پایی (۳۰ مایلی، ۵۰ کیلومتری) امتداد می‌یابد. امروزه مشخص شده است که درجه حرارت فقط در قسمتهای تحتانی این لایه ثابت است که به آن لایه Isothermal می‌گویند. بعد از آن درجه حرارت افزایش می‌یابد و در ارتفاع ۹۰ هزار پایی به ماکزیمم $-3^{\circ}C$ می‌رسد. افزایش درجه حرارت در این لایه ناشی از تجزیه اوزون و آزاد شدن حرارت است. این ناحیه را Ozonosphere می‌گویند که از ارتفاع حدود ۴۰ هزار پایی تا ۱۴۰ هزار پایی امتداد دارد.

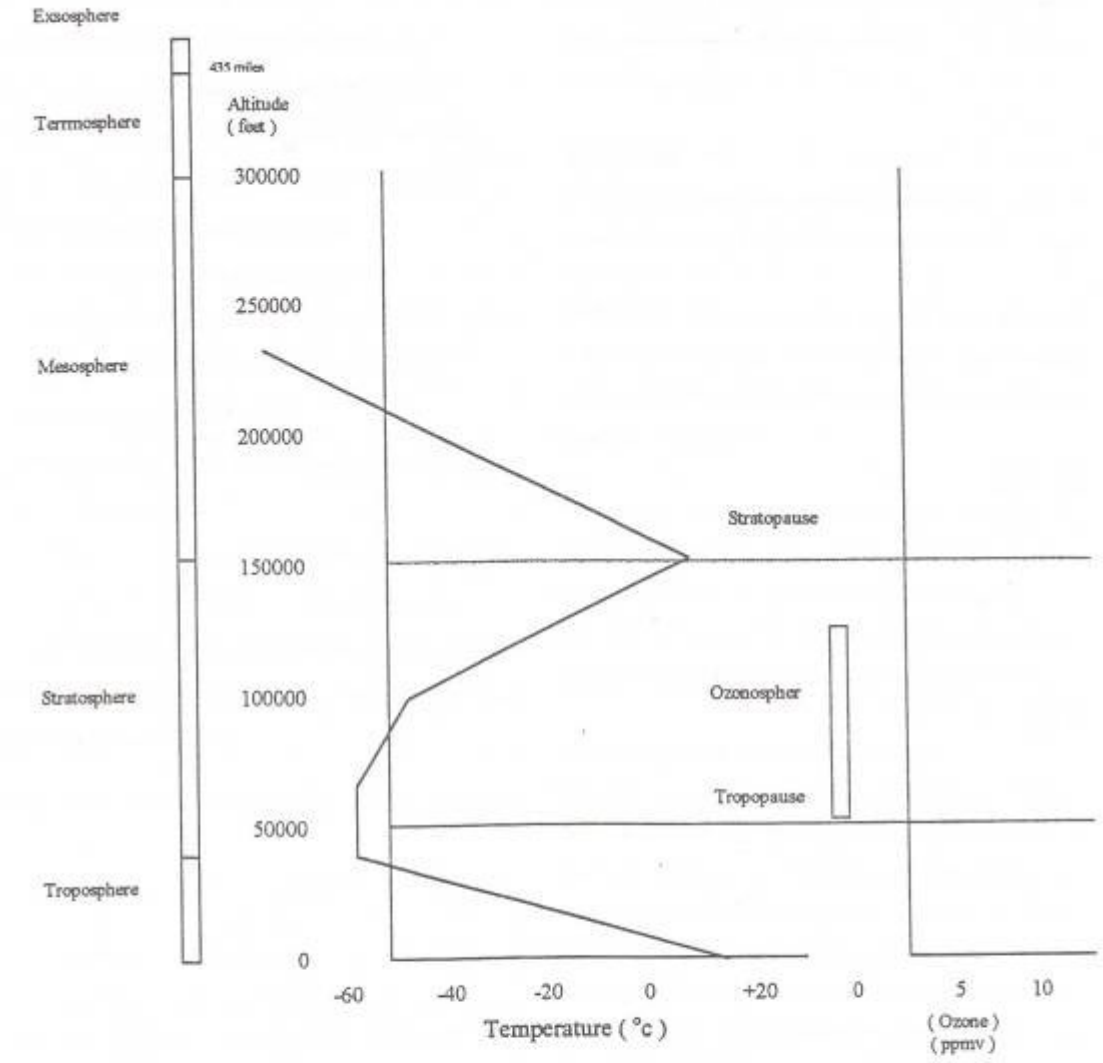
Mesosphere . از خصوصیات مزوسفر یا لایه میانی، کاهش سریع درجه حرارت در آن است. یعنی درجه حرارت از ۳- درجهٔ سانتیگراد در استراتوپوز به حدود $-113^{\circ}C$ در ارتفاع ۲۹۰ هزار پایی (۵۵ مایلی، ۸۵ کیلومتری) سقوط می‌کند.

Thermosphere . ترموسفر خارجی‌ترین لایه اتمسفر است و از خصوصیات آن، افزایش مداوم درجه حرارت است. میزان افزایش بستگی به میزان نور خورشید دارد. درجه حرارت می‌تواند هنگام روز به $1500^{\circ}C$ افزایش می‌یابد و در شب به $227^{\circ}C$ می‌رسد. ولی در هوایی که دارای دانسیته خیلی پایین می‌باشد، یک همچون درجه حرارتی، اثر حرارتی قابل ملاحظه بر روی هوا ندارد، ولی هر جسمی که در داخل این هوا باشد، متحمل درجه حرارت فوق خواهد بود.حد فوقانی ترموسفر، در حدود ۴۳۵ مایلی (۷۰۰ کیلومتری) قرار دارد. آن خارجی‌ترین لبه اتمسفر است. از آنجائیکه قسمت اعظم ذرات موجود در این لایه دارای بار می‌باشند، این لایه را Ionosphere نیز می‌گویند.

Exosphere . این لایه، همان شروع فضای حقیقی می‌باشد، و در داخل آن تصادم ذرات آنقدر اندک است که تقریباً می‌توان گفت که وجود ندارد. درجه حرارت در اینجا، همان مفهوم عادی را ندارد.

اتمسفر استاندارد

یک همچون استانداردی، برای کالیبراسیون وسایل پرواز و مقایسه قدرت هواپیماهای مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرد.اولین استاندارد اتمسفر، توسط ICAN در سال



شکل ۲: رابطه مابین درجه حرارت ارتفاع و لایه‌های اتمسفر

۱۹۲٤ نوشته شد (International Committee on Air Navigation) در این استاندارد، از قوانین ساده برای تعریف رابطه مابین فشار و ارتفاع استفاده شده است. بدنبال آن چندین استاندارد ملی و بالینی ابداع شدند، مثل استاندارد آمریکا، WADC (Wright Air Development Center) و ICAO (International Civil Aviation Organization). استانداردهای دیگری هم هستند، آنها تا ارتفاع ۶۵ هزار پایی خیلی شبیه به هم می‌باشند. شایعترین استانداردهای اتمسفر که استفاده می‌شوند، استاندارد آمریکا و ICAO می‌باشند، هر دو آنها تا ارتفاع صد هزار پایی از سطح دریا یکسان هستند.

The ICAO Standard Atmosphere

این استاندارد، خصوصیات حرارتی و فشاری، اتمسفر واقعی را در عرض جغرافیایی ٤٥ درجه شمالی بیان می‌کند. رابطه مابین فشار و درجه حرارت که توسط این استاندارد بیان می‌شود، بطور خلاصه در جدول ۲ آورده شده است. این در صورتی است که شرایط ایده‌آل زیر موجود باشند:

۱- هوا خشک و عاری از گرد و غبارات و ترکیب آن همانی است

که در جدول ۱ آورده شده است.

۲- فشار اتمسفر در سطح دریا ۷۶۰ mmHg است.

۳- دانسیته اتمسفر در سطح دریا $1/225\ Kgm^{3}$ است.

٤- توده ملکولی نسبی هوا در سطح دریا ۲۸/۹۶٤٤ است.

۵- شتاب ناشی از قوه جاذبه $9/80665\ ms^{2}$ و ثابت است.

۶- رابطه حرارت ـ ارتفاع به قرار زیر است:

a- درجه حرارت در سطح دریا = +۱۵°C

b- میزان متوسط زایل شدن حرارت = +۱/۹۸°C به ازای هر ۱۰۰۰ پا از سطح دریا تا ارتفاع ۳۶۰۸۹ پایی.

c- ارتفاع تروپوپوز = ۳۶۰۸۹ پا

d- حرارت لایه ایزوترمال در استراتوسفر از ۳۶۰۹۸ تا ۶۵۶۱۶ پایی -۵۶/۵°C

e- درجه حرارت بطور پیشرونده در بالای ۶۵۶۱۶ پایی افزایش و به -٤۶°C در ۱۰۰ هزار پایی می‌رسد.

دوباره تأکید می‌شود که در یک استاندارد بخصوص، تغییرات فشار با تغییر ارتفاع بیان می‌شود که در آن مابین درجه حرارت و ارتفاع نیز رابطه وجود دارد.

جدول ۳. محدوده بی‌خطر برای دکمپرسیون سریع بدون نیاز به خروج گاز از ریه‌ها

Initial Altitude (ft)	Initial Lung Volume (Fraction of Total Lung Capacity)	Maximum Safe Final Altitude (ft)
6000	0.25*	44000
	0.50+	29700
	0.75	20000
	1.00++	13000
25000	0.25*	61000
	0.50+	48500
	0.75	37500
	1.00+	31500

* = حجم ریوی متداول (حجم باقیمانده)؛ + = حجم ریوی انتهای بازدمی در حال استراحت (ظرفیت باقیماندهٔ عمل) و ++ = حجم ریوی ماکزیمم (ظرفیت ریوی توتال)

همانطور که در بالا نیز آورده شد، بسته به فصل سال و ارتفاع، تغییرات وسیعی در میزان درجه حرارت می‌تواند اتفاق بیافتد. این تغییرات دما، دارای اهمیت علمی، هم برای فیزیولوژیست و هم برای مهندس هوانوردی می‌باشد.

Density Altitude . و آن عبارت از فشار ارتفاعی است که برای اختلالات مابین درجه حرارت ثبت شده و درجه حرارتی که در جدول استاندارد است، تصحیح شده است که به آن در اصطلاح "ارتفاع حقیقی" می‌گویند.

قوانین گازها

قوانین گازها، اهمیت زیادی در فهم مکانیسمهایی دارد که با تغییرات در ارتفاع، فیزیولوژی بدن را تحت تأثیر قرار می‌دهند.

Boyle's Law . قانون بویل متذکر می‌شود که در یک درجه حرارت ثابت، حجم یک توده از یک گاز مشخص، رابطه ملکولی با فشاری دارد که به آن گاز اعمال می‌شود، از نظر ریاضی با فرمول زیر بیان می‌شود:

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{V_2}{V_1}$$

P_1 = فشاراولیه ، P_2 =فشارنهایی ، V_1 =حجم‌اولیه ، V_2 = حجم‌نهایی.

در اینجا، منظور از فشار، فشار مطلق است نه فشار دیفرانسیل. چون در هوا بخار آب نیز وجود دارد و گازهای بدن نیز در یک درجه حرارت ثابت بدن، از بخار آب اشباع هستند، بنابراین برای اهداف فیزیولوژیک فرمول بشکل زیر در می‌آید:

$$\frac{P_1 - P_{H_2O}}{P_2 - P_{H_2O}} = \frac{V_2}{V_1}$$

P_{H_2O} = فشار بخار آب در درجه حرارت بدن

چون درجه حرارت بدن ثابت است، P_{H_2O} نیز ثابت می‌باشد.

Charles's Law . بر طبق این قانون، حجم یک توده از یک گاز در فشار ثابت، رابطه مستقیم با درجه حرارت مطلق دارد. درجه حرارت مطلق یک گاز که برحسب درجه کلوین (Kelvin) اندازه‌گیری می‌شود، با اضافه کردن عدد ۲۷۳ به درجه حرارت سلسیوس بدست می‌آید. چون صفر مطلق برابر -۲۷۳°C می‌باشد. در صفر مطلق، حرکت ملکولی متوقف شده و از نظر تئوری، گازها دیگر دارای هیچ حجمی نیستند. از نظر ریاضی، قانون چارلز با رابطه زیر بیان می‌شود:

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{T_1}{T_2} = \frac{(t_1 + ۲۷۳)}{(t_2 + ۲۷۳)}$$

V_1 = حجم اولیه ، V_2 = حجم نهایی ، t_1 = درجه حرارت اولیه ، t_2 = درجه حرارت نهایی

T_1 = درجه حرارت مطلق اولیه (t_1 برحسب درجه سانتیگراد + ۲۷۳)

T_2 = درجه حرارت مطلق نهایی (t_2 برحسب درجه سانتیگراد + ۲۷۳)

Gay-Lussac's Law . این قانون شبیه قانون چارلز است. این قانون می‌گوید که در یک فشار ثابت، در مقابل یک میزان افزایش در درجه حرارت، تمامی گازها به یک میزان منبسط می‌شوند. قانون گای‌لوساک حجمهای گازی، متذکر می‌شود که

وقتی گازها بطور شیمیایی با هم ترکیب می‌شوند، حجم گازهایی که با هم وارد واکنش شده‌اند و حجم فرآورده‌های گازی، به یک نسبت هستند. این بشرطی است که درجه حرارت و فشار یکسان باشد.

Dalton's Law ، قانون دالتون برای فشارهای پارسیل است. بر طبق این قانون، فشاری که توسط یک مخلوطی از گاز اعمال می‌شود، برابر با مجمع فشارهایی است که هر کدام به تنهایی اعمال می‌کنند. این بشرطی است که گاز حاصله تمامی فضای موجود را اشغال کرده باشد. فشار یکی از اجزاء یک مخلوط گازی، فشار نسبی آن جزء نامیده می‌شود. این قانون را می‌توان توسط فرمول ریاضی زیر بیان کرد:

$$P_t = P_1 + P_2 + P_3 \ldots P_n$$

P_t = فشار توتال مخلوط گازی است و P_1 ، P_2 و P_3 فشار نسبی هر یک از اجزاء می‌باشد. فشار نسبی یا پارسیل یک گاز از یک مخلوط گازی را می‌توان با فرمول زیر محاسبه کرد:

$$P_x = F_x \ P_t$$

P_x = فشار نسبی گاز X

F_x = غلظت کسری گاز X در مخلوط گازی

P_t = فشار توتال مخلوط گازی

بعنوان مثال فشار نسبی اکسیژن (Po_2) در اتمسفر خشک در سطح دریا برابر است با:

$$Po_2 = \frac{۲۰/۹۵}{۱۰۰} \times ۷۶۰ = ۱۵۹/۲ \text{ mmHg}$$

Henry's Law ، بر طبق این قانون، یک توده از یک گاز که توسط یک توده از یک مایع مشخص جذب می‌شود، مقدارش رابطه مستقیم با فشار نسبی همان گاز در بالای همان مایع در یک درجه حرارت معینی دارد، این بشرطی است که گاز مربوطه با مایع ترکیب نشود وقتی حالت تعادل ایجاد شد، فشار نسبی همان گاز در مایع، برابر با فشار نسبی همان گاز در بالای مایع خواهد بود. مقدار مطلق گاز حل شده در حالت تعادل، با میزان حلالیت گاز در مایع و همچنین با فشار نسبی گاز رابطه دارد. بنابراین، وقتی فشار نسبی یک گاز در یک مایع کاهش می‌یابد، میزانی از آن گاز که بصورت محلول خواهد بود، کاهش می‌یابد. این اساس همان پدیدهٔ تشکیل حباب در مایعات بدن در مواجه با یک محیط کم فشار می‌باشد و سبب بیماری Decompression می‌شود.

قوانین دیفوزیون گازی

دیفوزیون یک فرایندی است که براساس آن، ملکولها در محلولهای مختلف از یک ناحیه با غلظت بالاتر به یک ناحیه با غلظت پایین‌تر حرکت می‌کنند. یعنی ملکولهای یک گاز با ملکولهای گاز دیگر بهم می‌آمیزند. میزان دیفوزیون یک گاز منفرد از ورای یک مایع یا یک مخلوط گازی، تابع چندین قوانین می‌باشد. میزان دیفوزیون بستگی به میزان اختلاف در فشارها در دو نقطه دارد. از طرف دیگر میزان دیفوزیون رابطه معکوس با جذر وزن ملکولی همان گاز دارد (Graham's Law) میزان دیفوزیون در یک مایع، با میزان حلالیت آن گاز در مایع رابطه مستقیم دارد، یعنی هر قدر حلالیت بیشتر باشد، دیفوزیون سریعتر خواهد بود.

دیفوزیون یک گاز از ورای یک بافت، مثل غشاء آلوئولی توسط قانون فیک Fick's بیان می‌شود. این قانون می‌گوید که میزان انتقال گاز از ورای یک بافت با سطح بافت و فشار نسبی گاز در دو طرف غشاء رابطهٔ مستقیم و با ضخامت بافت رابطهٔ معکوسی دارد. آن همچنین با ثابت دیفوزیون که در قانون گراهام توضیح داده شده است رابطهٔ مستقیم دارد. قانون فیک را با رابطه زیر می‌توان بیان کرد:

$$Vgas \propto \frac{A}{T} \ D \ (P_1-P_2)$$

$$D \propto \frac{Sol.}{\sqrt{M.W.}}$$

Vgas = میزان گازی که منتقل می‌شود؛ A = مساحت بافت؛ T = ضخامت بافت؛ M.W. = وزن ملکولی؛ P_1-P_2 = اختلاف فشار نسبی گاز از ورای بافت؛ D = ثابت دیفوزیون؛ و Sol = میزان حلالیت گاز.

اندازه گیری فشار

فشار عبارت است از نیروی عمودی به ازای هر واحد سطح. یک ستون از مایع یا گاز یک فشاری اعمال خواهد کرد که رابطه مستقیم با ارتفاع ستون، دانسیته داخل آن و شتاب ناشی از قوه جاذبه دارد. طبق تعاریف فوق، فشار اتمسفری عبارت از نیرویی است که توسط یک ستون از هوا، در سطح دریا، بر روی سطح زمین اعمال می‌شود. این نیرو ۱ kg/cm^2 (۱ bar, ۱ atmosphere, ۷۶۰ mmHg, ۱٤/۷ lb/in^2) است. ولی مهندسین هوانوردی، به غیر از فشار اتمسفری، از مقادیر دیگری نیز استفاده می‌کنند. فشار مطلق یک گاز یا یک مایع عبارت از فشار توتالی است که آن گاز یا مایع اعمال می‌کند. این فشار مطلق شامل فشار اتمسفری نیز هست. بنابراین اگر فشار مطلق صفر باشد، به معنای خلأ کامل است که در اعماق فضا یافت می‌شود. دستگاههای اندازه‌گیری فشار، مثل دستگاهی که با آن فشار تایر اتومبیل اندازه‌گیری می‌شود، به یک فشاری پاسخ می‌دهند که بیش از هر جزء اتمسفری است. بعنوان مثال، یک فشارسنج تایر ممکن است فشار ۳۰ lb/in^2 را در داخل تایر

نشان دهد که به آن Gauge Pressure یا فشار مقیاسی می‌گویند، ولی فشار مطلقی که در داخل تایر است، شامل جزء اتمسفری نیز هست، یعنی فشار مطلق در داخل این تایر در سطح دریا ۴۴/۷ lb/in^2 خواهد بود.

فشار اتمسفر + فشار مقیاسی = فشار مطلق

فشارهایی که کمتر از فشار اتمسفری باشند، فشار مقیاسی منفی ایجاد خواهند کرد و اینها با خلأهای نسبی دارای رابطه هستند، ولی یک فشار مطلق نمی‌تواند کمتر از صفر باشد.

در فیزیولوژی، افتراق بین فشار مطلق و فشار مقیاسی مهم است. بعنوان مثال در غواصی، وقتی یک نفر قبل از نزول در آب، در سطح دریا تحت فشار یک اتمسفر بوده است، وقتی به عمق ۳۰ متری می‌رسد، فشارسنج وی ۳ اتمسفر را نشان می‌دهد، در صورتیکه فشار مطلق ۴ اتمسفر است. این نکته در فیزیولوژی هوایی هنگام تنظیم فشار کابین دارای اهمیت است. فشار مطلق داخل کابین یک هواپیما برابر با مجموع فشار اتمسفری در سطح خارجی هواپیما و فشار دیفرانسیل کابین می‌باشد. فشار دیفرانسیل کابین، اختلاف مابین فشار مطلق در داخل هواپیما با اتمسفر خارج هواپیما می‌باشد.

(مطلق) فشار اتمسفر - فشار مطلق داخل کابین = فشار دیفرانسیل کابین

(مطلق) فشار اتمسفر + فشار دیفرانسیل کابین = فشار مطلق کابین

بعنوان مثال، فشار اتمسفری احاطه‌کننده یک هواپیما که در ارتفاع ۲۵ هزار پایی پرواز می‌کند، ۲۸۲ mmHg (۵/۴۵ lb/in^2 abs) است و اگر فشار دیفرانسیل کابین ۲۳۶ mmHg (۴/۵۵ lb/in^{2}g) باشد، فشار مطلق داخل کابین، مجموعه این دو یعنی ۵۱۸ mmHg (۱۰ lb/in^2 abs) خواهد بود و ارتفاع کابین نیز درست بالای ده هزار پا خواهد بود.

اندازه گیری حجم گازها

در فیزیولوژی و پزشکی، قوانین گازها، بیشترین تأثیر را بر روی سیستم تنفسی دارند. تغییر در درجه حرارت و فشار، تأثیرات عمیق بر روی مقادیری دارند که در اسپیرومتری بدست می‌آیند. بنابراین درک و فهم حالات مختلفی که تحت آن این اندازه گیریها انجام می‌شوند، اهمیت حیاتی دارد.

بطور کلی، همه قبول کرده‌اند که درجه حرارت بدن از جمله ریه‌ها ثابت است و بخار آبی که در ریه‌ها هست در حد فشار اشباع می‌باشد. مقادیری که مورد استفاده قرار می‌گیرند ۳۷ درجه سانتیگراد برای درجه حرارت بدن و برای فشار بخار آب اشباع شده در آن درجه حرارت، ۴۷ mmHg منظور می‌شود. گاز که در ریه‌ها تحت شرایط فوق وجود دارد، می‌گویند که به اصطلاح BTPS[1] است. وضعیتهای BTPS حالاتی هستند که مناسب‌ترین موقعیت برای بررسیهای تنفسی می‌باشند. در اکثر موارد درجه حرارت اطراف ما کمتر از درجه حرارت گاز موجود در ریه‌هاست، ضمناً بخار آب آن نیز کمتر است. علت آن این است که اولاً هوای اتمسفر معمولاً از بخار آب اشباع نمی‌باشد، ثانیاً در درجه حرارت پایین‌تر، فشار بخار آب اشباع شده نیز پایین‌تر است (Ipso Facto) . اگر تحت این شرایط اندازه گیریهای تنفسی انجام شوند، گفته می‌شود که تحت شرایط ATP (Ambient Temperature and Pressure) بوده است، ولی همانطور که در آزمایشگاهها معمول است، اندازه گیریهای تنفسی از طریق یک اسپیرومتر آبی انجام می‌شوند و شرایط اندازه گیری در آزمایشگاه ATPS[2] خواهد بود.

هوای اطراف ما با عبور از دستگاه تنفسی فوقانی، هم گرم شده و هم مرطوب می‌گردد و طبق قانون Gay Lussac ، انبساط پیدا می‌کند. اهمیت فیزیولوژیک این امر این است که حجم گاز دمی کمتر از حجم گاز بازدمی خواهد بود. میزان اُفت در آب هوای معتدل حدود ده درصد است، ولی فیزیولوژیستها بایستی بتوانند بطور دقیق‌تر V_{ATPS} را به BTPS تصحیح کنند. با استفاده از فرمول ریاضی زیر می‌توان این اصلاح را انجام داد.

$$V_{BTPS} = V_{ATPS} \frac{۲۷۳ + ۳۷}{۲۷۳ + t_a} \quad \frac{P_a - P_{H_2O}}{P_B - ۴۷}$$

۲۷۳ نقطه ذوب یخ به کلوین، ۳۷ درجه حرارت بدن به درجه سانتیگراد، t_a درجه حرارت محیط به درجه سانتیگراد و P_B فشار بارومتریک به mmHg می‌باشد. P_{H_2O} عبارت از فشار بخار آب اشباع شده در t_a و ۴۷ نیز فشار بخار آب اشباع شده در درجه حرارت بدن می‌باشد.

اولین کسر از فرمول فوق، میزان انبساط ناشی از گرما و دومین کسر میزان افزایش حجم ناشی از اضافه شدن بخار آب را نشان می‌دهد. با اینهمه، هنگام مواجه با فیزیولوژی متابولیک نیاز به ملزومات دیگری است. در این مورد، تعداد ملکولهای اکسیژن که مصرف می‌شود و تعداد ملکولهای CO_2 که تولید می‌شود اهمیت دارند، نه حجم. بنابراین بایستی حجمهای O_2 و CO_2 را تحت حالات استاندارد یا طبیعی تعریف نمود STPD[3] درجه حرارت استاندارد (۰°C) ۲۷۳ kl و فشار استاندارد ۷۶۰ mmHg است. وقتی تعاریف به این ترتیب هستند، تعداد ملکولهای موجود در داخل STPD را می‌توان به راحتی محاسبه

1. Body Temperature and Pressure Saturated with Water Vapour
2. Ambient Temperature and Pressure Saturated with Water Vapour
3. Standard Temperature and Pressure, Dry

کـرد. چـون تـحت شـرایـط STPD ، گـازها از قـانون آواگـادرو (Avogadro) پیروی می‌کنند. این قانون می‌گوید که یک گرم مول (gram-mole) از یک گاز، حجم ۲۲/٤۱ خواهد داشت (STPD) .

شرایطی کـه بـرای STPD لازم است، مـی‌توان بـصورت فرمول زیر بیان کرد:

$$V_{STPD} = V_{ATPS} \frac{۲۷۳}{۲۷۳ + t_a} \cdot \frac{PB - P_{H_2O}}{۷۶۰}$$

در فرمول فوق، ۲۷۳ نقطه ذوب یخ به کلوین، t_a درجه حرارت محیط سانتیگراد، P_a فشار بارومتریک بـه mmHg ، P_{H_2O} فشار بخار آب اشباع شده در t_a و ۷۶۰ نیز فشار اسـتاندارد است. سرانجام در تعریف سیستمهای تنفسی، دو شرایط انـدازه‌گیری جداگانه وجود دارند که از نظر مهندسین دارای اهـمیت ویـژه هستند. حجم گازها اغلب تحت شرایـط ATPD و مـصرف گـازها تحت شرایط NTP بیان می‌شوند.

Atmospheric Temperature and Pressure, Dry (ATPD)

Normal Temperature and Pressure (NTP)

در انگلستان حرارت و فشار در شرایط ATPD به ترتیب ۱۵°C+ و فشار مـطلق گـاز در داخـل مـوقعیتی است کـه انـدازه‌گیری می‌شود (مثلاً فشار مطلقی که در داخل ماسک وجود دارد) بـه همین تـرتیب، درجـه حـرارت و فشـار تـحت شـرایـط NTP بـه ترتیب ۱۵°C+ و ۷۶۰ mmHg خواهند بود.

اینکه لازم است مقادیر گاز تحت شرایط NTP بیان شود، بدین دلیل است که گازها دارای خاصیت انبساط شدگی هسـتند؛ یعنی اگر فشار محیط کم باشد، گازها منبسط مـی‌شوند. در یک ارتفاع، میزان جریان حجم (Volume Flow) به همان اندازه میزان جریان توده‌ای (Mass Flow) نمی‌باشد. با افزایش ارتفاع مـیزان اختلاف مابین آن دو نیز افزایش مـی‌یابد. بـه عـنوان مـثال، یک جریان توده‌ای ٤ لیتر (NTP) در دقیقه، یک جریان کم حـدود ۸ لیتر (ATPD) در دقیقه، در ارتـفاع ۱۸۰۰۰ پـایی ایـجاد مـی‌کند. جائیکه فشار اتمسفری نصف آن در سطح دریاست و انبساط نیز تقریباً طبق قانون بویل اتفاق خواهد افـتاد. در حـقیقت، جـریان حجمی یک گاز، هرگز با جریان توده‌ای آن یکسان نخواهد بود، حتی در سطح دریـا. ایـن در فـیزیولوژی تـنفسی در ارتـفاعات دارای اهـمیت مـی‌باشد، چـون خـود تـنفس یک پـدیده از نـوع جریان حجمی اسـت.

تأثیرات تغییر فشار

بدن انسان حاوی چندین محفظه پُر از گـاز است کـه بـه طُـرُق مختلفی با محیط خارجی در ارتباط هستند. هنگام تغییر در فشار محیط، مثل صعود یا نزول با هواپیما و یا از بین رفتن نـاگهانی فشار کابین، فشار در داخل این محفظه‌ها با فشار گاز در محیط خارجی به تعادل خواهد رسید و این سبب یک عـده اثرات سـوء در بدن می‌شـود.

چگونگی رفتار یک گاز در داخل یک حـفره هـنگام تـغییر فشار و اثرات نهایی آن بر روی بدن، بستگی به این دارد که این حفره نیمه بسته باشد یا بسته. از حفره‌های نیمه بسته مـی‌توان از ریه‌ها، گوش میانی و سینوسهای پارانازال اسم بـرد. دسـتگاه گوارش نیز یک حفره از نوع بسته می‌باشـد.

مکانیسم انبساط گازها

گازی که در داخل حفرات قابل اتساع بـدن قـرار دارد، تـوسط تـغییرات فشـار در خـارج از بـدن تـحت تأثیر قـرار مـی‌گیرد. طوریکه با کاهش فشار اتمسفری (هنگام صعود یا از بـین رفـتن فشار کابین) حجم گاز افزایش می‌یابد. هنگام نزول، فرایند فـوق برعکس می‌شود و حجم گاز مـوجود در داخـل حـفرات کـاهش می‌یابد.

میزان انـبساط یک گـاز، هـنگام تـغییر فشـار اتـمسفر، از قانون بویل پیروی می‌کند. این قانون می‌گوید که حجم یک گاز با فشار مطلق رابطه معکوس دارد. با اینهمه، چـون جـدار حـفرات بدن همیشه مرطوب می‌باشد، گازهای موجود در داخل حفرات فوق معمولاً اشباع از بخار آب هسـتند. اگر حجم یک گاز باکاهش فشار افزایش یابد؛ فشار نسبی بخار آب نیز تمایل به سقوط پیدا خواهد کرد، ولی تخلیه خیلی سریع آب از پوشش جدار حـفرات بدن، سبب می‌شود کـه تـقریباً در تـمامی حـالات، اشـباع کـامل برقرار باشـد.

فشار نسبی که بخار آب اعمال می‌کند مـنحصراً تـوسط درجه حرارت مشخص مـی‌شود. آن مـعمولاً در درجـه حـرارت ۳۷°C، برابر ٤۷ mmHg اسـت. انبساط نسبی یک گاز نسبت حجم نهایی به حجم ابتدایی یک گاز در داخل حفرات بدن است. آن را می‌توان توسط فرمول زیر بیان کرد:

$$\text{انبساط نسبی گاز} = \frac{(P_c - ٤٧)}{(P_f - ٤٧)}$$

در این فرمول، P_c فشار اولیه گاز در داخل حفره به mmHg و P_f فشار نهایی گاز بـه mmHg مـی‌باشـد. بـنابرایـن، در یک نسـبت فشار هر قدر ارتفاع افـزایش یـافت، مـیزان انـبساط گـازها نـیز بیشتر خواهد بود. تا ارتفاع ۶۳۰۰۰ پایی (۱۹۰۰۰ متری) از نظر تئوری، میزان انبساط گاز نامحدود خواهد بود. فشار اتـمسفری در این ارتفاع ٤۷ mmHg می‌شود، ولی در عمل، گازهایی که در

داخل حفره‌ای از بدن که ونتیلاسیون ندارد قرار دارند. بطور کاملاً آزاد انبساط پیدا نمی‌کنند. چون با افزایش انبساط بافتهای اطراف حفره یک مقاومت فزاینده‌ای ایجاد می‌کنند و باعث می‌شود که فشار داخلی همان حفره افزایش یابد؛ یعنی این فرایند خود محدودشونده است و انبساط نامحدود گاز اتفاق نمی‌افتد. حتی در مواردی که حفره به مدت طولانی در معرض فشارهای اتمسفری کمتر از ٤٧ mmHg قرار گیرد.

وقتی مابین یک حفره پُر از گاز و اتمسفر خارج آن، یک ارتباط غیرمحدودکننده وجود دارد انبساط گاز با مشکل اندکی اتفاق می‌افتد و ناراحتی ایجاد نمی‌کند.

اثرات تغییرات فشار در حفرات نیمه‌بسته

گوش میانی. حفره گوش میانی توسط پرده تمپان از گوش خارجی جدا می‌شود. آن با نازوفارنکس ارتباط دارد. این ارتباط توسط لوله استاش می‌باشد؛ یعنی گوش میانی با اتمسفر در ارتباط است. دو سوم ابتدایی لوله استاش، دارای جدار نرم است که در حالت طبیعی، رویهم خوابیده است. هنگام صعود به ارتفاعات، گاز موجود در گوش میانی انبساط پیدا کرده و از طریق لوله استاش به نازوفارنکس می‌رود. طوریکه فشار در هر دو طرف پرده تمپان یکسان باقی می‌ماند. چون ساختمان آناتومیک قسمت حلقی لوله استاش طوری است که آن را بصورت یک دریچه‌ای که یکطرفه عمل می‌کند درآورده است، هوای منبسط شده به آسانی می‌تواند بطرف اتمسفر حرکت کند. با هوا دادن پاسیو گوش میانی در حین رفع فشار (Decompression)، بعید است که مشکلات جدی ایجاد گردد. ونتیلاسیون پاسیو گوش میانی در حین صعود، یک احساس Popping ایجاد می‌کند. علت آن ورود هوا از لوله استاش به داخل حلق است. هنگام صعود لوله استاش باز شده و هوا از گوش میانی وارد نازوفارنکس می‌شود. این اتفاق هر ۵۰۰-۱۰۰۰ پا اتفاق می‌افتد.

هنگام نزول گاز از نازوفارنکس، بایستی وارد گوش میانی شود تا مابین فشار اتمسفری خارج و فشار گاز در گوش میانی یک تعادل برقرار گردد. در اکثر افراد، مکانیسم دریچه یکطرفه لوله استاش، از جریان پاسیو گاز بطرف عقب بداخل حفره گوش میانی جلوگیری می‌کند. افزایش نسبی فشار در خارج پرده تمپان، پرده را بطرف گوش میانی می‌راند. با ادامه نزول پرده تمپان، بیشتر بطرف گوش میانی فشرده می‌شود تا موقعیکه گاز بتواند از ورای لوله استاش وارد گوش میانی شود. این اختلال سبب احساس پُری در گوش و کاهش قدرت شنوایی می‌شود. اگر نزول بدون تعادل فشار مابین اتمسفر و گوش میانی همچنان ادامه یابد، اختلاف فشار از ورای پرده گوش سبب درد می‌شود. در بعضی افراد حساس، یک تغییر سریع در فشار حفره گوش میانی، اعضاء تعادل در گوش داخلی را تحت تأثیر قرار داده و سبب سرگیجه می‌شود.

برای متعادل ساختن فشار در ورای پرده تمپان در حین نزول و جلوگیری از ایجاد آسیب فشاری به گوش (Otic Barotrauma)، لازم است بعضی مانورهایی را که سبب باز شدن لوله استاش می‌شوند، انجام داد. بعضی مانورهای ساده مثل قورت دادن، خمیازه کشیدن و حرکت دادن فک، ممکن است لوله استاش را باز کنند ولی مانورهای فوق، در نصف جمعیت پروازی بدون اثر هستند. این افراد بایستی فشار در نازوفارنکس را بالا ببرند تا بتوانند گاز را با فشار وارد حفره گوش میانی کنند. این افزایش فشار را می‌توان توسط مانور Valsalva یا Frenzel بدست آورد. برای انجام وانورواسالوا لبها بسته شده و سوراخهای بینی توسط دست مسدود می‌شوند و سپس فرد سعی می‌کند که با فشار در حالیکه دهان و بینی بسته است، بازدم انجام دهد. از این مانور اکثراً در حین پرواز استفاده می‌شود ولی چون با این مانور فشار داخل توراکس افزایش می‌یابد، در تحت بعضی شرایط سبب آسیب به فونکسیون قلبی عروقی می‌گردد. مانور Frenzel فشار را بطور لوکال در نازوفارنکس افزایش می‌دهد. انجام این مانور بدین ترتیب است که گلوت و لبها بسته شده و سوراخهای بینی نیز مسدود می‌شوند. همزمان با آن، عضلات کف دهان و حلق نیز منقبض می‌گردند. این اعمال هماهنگ شبیه به همان اعمالی هستند که فرد هنگام فین کردن یکطرفه بینی و هنگام جلوگیری از عطسه کردن انجام می‌دهد. مزایای مانور فرنزل این است که اولاً در فشارهای پایین‌تری از نازوفارنکس سبب باز شدن شیپوراستاش می‌شود و ثانیاً در هر مرحله از تنفس می‌توان آن را انجام داد. مانور دیگری که بایستی به آن توجه کرد، مانور Toynbee می‌باشد. در این مانور، در حالیکه سوراخهای بینی گرفته شده است، عمل بلع انجام می‌شود. این عمل همچنین در سطح زمین نیز لوله استاش را باز می‌کند ولی اینکار را با یک فشار کاهش یافته در نازوفارنکس انجام می‌دهد. این عمل برای چک کردن باز بودن لوله‌ها مفید است ولی بعنوان یک مانور در حین نزول توصیه نمی‌شود.

توصیه اینکه این مانورها چند بار در طول پرواز انجام شوند، متفاوت است. از هر ۱۰۰۰ پا تا هر ٤۰۰۰ پا یا بیشتر توصیه شده است. بنابراین، میزان افزایش دادن فشار در نازوفارنکس خودش دارای حد و حدودی می‌باشد. ممکن است وقتی اختلاف فشار مابین گوش میانی و خارجی، بیش از

۹۰-۱۲۰ mmHg باشد، لوله استاش مسدود باقی بماند.

عفونت دستگاه تنفس فوقانی، سبب احتقان و ادم در پوشش مخاطی لوله استاش، بویژه در قسمتی می‌شود که بداخل نازوفارنکس باز می‌شود. این احتقان ممکن است در حین نزول، از عبور گاز به گوش میانی جلوگیری نماید. بعد از آن پرده تمپان بطرف گوش میانی کشیده شده و سبب کری و درد می‌گردد.

اگر نزول همچنان ادامه یابد و پرده تمپان نیز بیمار باشد، پرده ممکن است پاره شود و درد ناگهان ساکت خواهد شد. تغییرات در پرده تمپان و گوش میانی که به علت ونتیلاسیون ناکافی گوش میانی ایجاد می‌شوند، در اصطلاح Otic Barotrauma نامیده می‌شوند. این حالت بیشتر همراه با عفونت دستگاه تنفسی فوقانی اتفاق می‌افتد ولی در هنگام نزول خیلی سریع و عدم آگاهی به ونتیلاسیون گوش میانی نیز اتفاق می‌افتد.

سینوسهای پارانازال. سینوسهای پارانازال حفراتی هستند که در استخوانهای صورت و جمجمه واقع شده‌اند. سینوسهای فرونتال توسط مجاری نسبتاً دراز با بینی در ارتباط هستند ولی هر یک از سایر سینوسها، توسط یک سوراخ در جدارشان با بینی در ارتباط هستند. هنگام صعود و نزول، گاز منبسط شده و منقبض شده محتوای سینوس بطور آزاد با گاز موجود در داخل بینی در ارتباط می‌باشد و اختلاف فشار مابین گاز موجود در داخل سینوس و انمسفر خارجی ایجاد نمی‌شود. وقتی پوشش مخاطی مجاری که سینوسها را به بینی متصل می‌کنند دچار التهاب و ادم شوند، ونتیلاسیون پاسیو طبیعی حفره سینوس، بویژه در حین نزول دچار مشکل خواهد شد. یک همچون اتفاقی باعث درد شدید در گونه‌ها، پیشانی و در عمق سر می‌شود. این درد اغلب همراه با آبریزش از چشمهاست. تحت این شرایط، هوا دادن سینوسها توسط فرد، آسان نمی‌باشد. این حتی با مانورهایی که فشار را در دهان و حفره بینی افزایش می‌دهند نیز امکان‌پذیر نیست. ضداحتقانهای بینی ممکن است در برقراری ونتیلاسیون کمک‌کننده باشند. ممکن است خونریزی بداخل حفره سینوسها اتفاق افتاده و آسیب بیشتری به پوشش مخاطی بزنند. این حالت Sinus Barotrauma حاد اغلب بطور مکرر عود می‌کند و ممکن است سرانجام نیاز به درمان جراحی داشته باشد.

ریه‌ها. هنگام کاهش خیلی سریع فشار، مثل مواردی که فشار کابین بطور ناگهانی از دست می‌رود، ریه‌ها به چند دلیل مستعد آسیب‌پذیری هستند. اولاً اینکه حجم گاز موجود در آلوئولها زیاد است، راههایی که آلوئولها را به محیط خارجی مرتبط می‌سازند، باریک هستند و سرانجام بافت ریه اگر بیش از حد تحت کشش باشد، مستعد آسیب می‌باشد. اگرچه هنگامی که راههای هوایی باز هستند در حالت رفع فشار، آسیب جدی گزارش نشده است ولی بررسیها در روی حیوانات نشان داده‌اند که رفع فشار سریع از فشارهای بالا، سبب آسیب ساختمانی به ریه همراه با خونریزی آمفیزم و آتلکتازی می‌گردد. توانایی ریه‌های انسان برای تطابق با فشارهای مختلف دارای محدودیتهایی است و هنگام طرح‌ریزی کابینهای Pressurized بایستی توجه دقیق به این مسئله کرد.

میزان دکمپرسیون ریه‌ها به علت مقاومتی که در برابر جریان در راههای هوایی فوقانی وجود دارد، محدود است. بنابراین هر گاه کاهش فشار در محیط سریعتر از ماکزیمم ظرفیت ریه‌ها برای کاهش دادن فشار باشد منجر به فشار دیفرانسیل مثبت موقتی مابین گاز موجود در ریه‌ها و گاز موجود در هوای کابین خواهد شد. هر قدر میزان کاهش فشار در کابین سریعتر باشد، اختلاف فشار گذرا نیز بیشتر خواهد بود. مدت و شدت اختلاف مابین فشار گاز در ریه‌ها و کابین، در حین یک دکمپرسیون (Decompression) سریع، به فاکتورهای زیر بستگی دارد:

۱- میزان کاهش فشار در کابین نسبت به میزان کاهش همزمان فشار در ریه‌ها.

۲- میزان تغییر توتال فشار کابین در حین کاهش فشار.

۳- حجم گاز موجود در ریه‌ها در شروع از بین رفتن فشار.

٤- توانایی ریه‌ها و توراکس به انبساط در حین کاهش فشار.

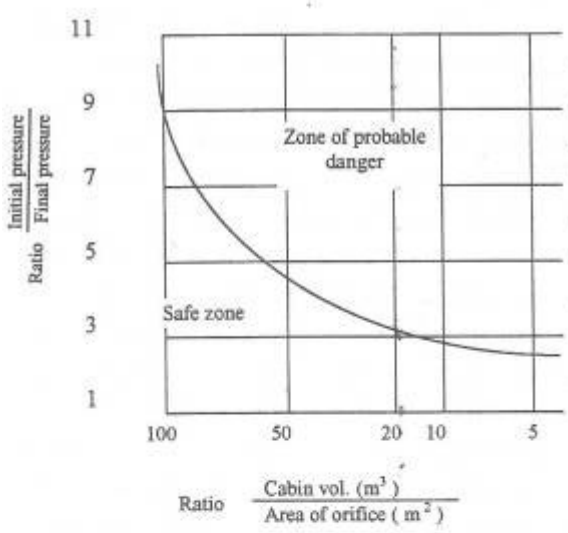
هنگام زایل شدن سریع فشار، بعلت کشش بیش از حد بافت الاستیک ریه، آن دچار آسیب می‌شود. با منبسط شدن گاز در داخل ریه‌ها، جدار قفسه سینه و دیافراگم بطرف خارج حرکت می‌کنند. اگر انبساط گاز در داخل ریه به اندازه‌ای باشد که از حجم توتال ریه‌ها فراتر نرود، آسیبی اتفاق نخواهد افتاد ولی اگر اتساع ریه‌ها بیشتر از حجم توتال ریه‌ها شد، بافت ریه بیش از حد کشیده خواهد شد. سرانجام بافت ریه و عروق خونی پاره می‌شوند. اختلاف فشار ترانس‌توراسیک که لازم است سبب پارگی ریه‌ها شود، ۸۰-۱۰۰ mmHg است. این در حالی است که عضلات شکم و جدار قفسه سینه در حالت شل باشند. وقتی بافت ریه پاره شود، هوا از طریق سطوح بافتی وارد مدیاستن و یا حتی وارد کردن می‌شود و سبب آمفیزم جراحی می‌گردد. از طرف دیگر گازها وارد عروق خونی پاره شده و سبب آمبولی گاز ژنرالیزه می‌شوند.

بدترین موقعیت وقتی است که گاز موجود در داخل ریه‌ها، در حین سقوط فشار محیط نتواند از ریه‌ها خارج شود. خروج آزادانه گاز منبسط شده به انمسفر، توسط موارد زیر

جلوگیری می‌شود.

بسته شدن گلوت در مواردی مثل نگهداشتن تنفس، بلعیدن، زور زدن و گاهی بعلت خصوصیات تجهیزات تنفسی که مورد استفاده قرار می‌گیرند، از خروج آزادانه گاز جلوگیری می‌شود. بنابراین در Pressure Demand Oronasal Mask که یک دریچه وجود دارد، این دریچه بدنبال از بین رفتن سریع فشار، بسته شده و همانطور بسته باقی می‌ماند. میزان دکمپرسیونی که بی‌خطر است (به عنوان مثال، فشار ترانس‌توراسیک، وقتی هیچ گازی از ریه‌ها نمی‌تواند بیرون رود، از ۵۰ mmHg زیادتر نشود) را اگر میزان گاز اولیه موجود در ریه‌ها را بدانیم می‌توانیم محاسبه کنیم. حدود بی‌خطر برای دکمپرسیون سریع بدون خروج گاز از ریه، در جدول ۳ آورده شده‌اند. وقتی گاز موجود در ریه‌ها آزادانه می‌تواند از آن خارج شود، مشکل است بتوان شرایط فرد را پیش‌بینی کرد؛ یعنی پیش‌بینی اینکه این افراد ممکن است یک فشار ترانس‌توراسیک ۸۰ mmHg تولید کنند و ریه‌هایشان آسیب ببینند، مشکل است. شرایط فردی عبارتند از ارتفاع ابتدایی به نهایی و نسبت حجم کابین به سطح سوراخی که از آن کابین رفع فشار می‌شود.

اکثر اطلاعاتی که در دسترس هستند، از روی تجربیات حیوانی می‌باشند ولی اطلاعاتی نیز در دسترس هستند که از روی آنها بتوان دکمپرسیون بی‌خطر (Safe Decompression) را در انسان مشخص ساخت. شرایط محدودکننده نسبت فشار ابتدایی به نهایی و نسبت حجم کابین به سطح مقطع سوراخ که ورای آنها ریه‌ها آسیب خواهند دید، در شکل ۳ آورده شده‌اند. حالات دکمپرسیون که در سمت چپ منحنی قرار دارند، بی‌خطر هستند بشرطی که گلوت باز باشد. دکمپرسیون تحت شرایطی که در طرف راست منحنی قرار دارند ممکن است ریه‌ها را آسیب بزند یا می‌زند. در عمل، آسیب به ریه ناشی از دکمپرسیون، هم در یک هواپیما و هم در محفظه دکمپرسیون یک حادثه خیلی نادری است.



شکل ۳. حالاتی که در آن دکمپرسیون سریع سبب آسیب به ریه نخواهد شد (منطقه بی‌خطر) و مواردیکه آسیب ایجاد خواهد شد (منطقه خطرناک).

اثرات تغییرات فشار در حفرات بسته

دستگاه گوارش. در افراد طبیعی و سالم، معده و روده‌ها شامل یک مقداری گاز می‌باشند. حجم این گاز از ۴۰۰ ml-۰ متفاوت است. میزان متوسط آن ۱۰۰ ml می‌باشد. منشأ این گاز عبارتند از هوای بلعیده شده، اثر باکتریها در روده و تبادل گاز مابین بافتها و خون.

هنگام صعود، گازی که در معده است منبسط شده و معمولاً از طریق مری و دهان خارج می‌شود. حبابهای گاز در روده بزرگ بهم پیوسته و از راه مقعد خارج می‌شوند. بعضی افراد، معمولاً کارکنان پروازی بدون تجربه، در خارج ساختن گاز از راه دهان و مقعد، حتی در صعودهای کم‌ارتفاع مشکل دارند. در صعودهای با ارتفاع زیاد و دکمپرسیون سریع، این مشکل افزایش می‌یابد و حتی افراد با تجربه نیز در خارج ساختن گاز از دستگاه گوارش به همان سرعتی که منبسط می‌شود، دارای مشکل هستند. در این موارد، معمولاً در قسمتهای فوقانی و تحتانی شکم درد ایجاد می‌شود و در بعضی موارد استثنایی این درد شدید است. در بعضی افراد حساس، درد شکم ناشی از انبساط گازها، سبب سنکوپ وازووااگال می‌گردد. اتساع گاز در دستگاه گوارش، هرگز سبب آسیب احشایی نمی‌شود.

مشکل انبساط گاز در دستگاه گوارش، در افرادیکه دارای عفونتهای خفیف روده‌ای هستند و در آنهاییکه از غذاهای نفاخ و ایجادکننده گاز (لوبیا، نخود، کل‌کلم، کلم‌پیچ و غذاهای حاوی سلولز زیاد و نوشابه‌های گازدار) استفاده می‌کنند، تشدید می‌یابد. کارکنان پروازی به تجربه پیدا می‌کنند که چه غذاهایی مصرف نمایند تا برایشان مشکل‌ساز نباشد. شیوع ناراحتی و درد شکم در کارکنان پروازی که از سلامت برخوردار هستند، اگر ارتفاع بیش از ۲۵ هزار پا نباشد، ناچیز است. حتی این افراد اگر به ارتفاع ۴۰ هزار پایی بروند و مدت اقامت در این ارتفاع کوتاه باشد، فقط ۳-۲ درصد دچار درد شکم می‌شوند.

دندان. انبساط گاز موجود در دندان هنگام صعود به ارتفاعات، ممکن است سبب دندان درد شدید (Aerodontalgia) شود. منشأ گاز موجود در دندان، ممکن است ناشی از پُر کردن

پوسیدگی دندان باشد. استفاده از مواد پُرکننده جدید در دندانپزشکی، میزان بدام افتادن گاز در دندان را کاهش داده و امروزه دندان درد ناشی از گاز، نادر است ولی افرادیکه دندانهای ناسالم دارند، ممکن است باز دچار دندان درد ناشی از هوا شوند. بعنوان مثال، افرادیکه دارای آبسه مزمن یا خاد اپیکال هستند، گاز ناشی از پوسیدگی جمع شده و در آپکس دندان سبب ایجاد حبابهای کوچک می‌گردد.

References

1. Borg N (1981). Editor: Core Curiculum for critical care nursing, de 2. Philadelphia, WB Saunders.

2. Button GG, and Helmholz HF (1984). Gas laws and certain indispensable conversions. In: Burton GG, Hodgkin JE, editors: Respiratory care: a guide to clinical practic, ed 2. Philadelphia, JB Lippincott.

3. Billing CE (1973). Atmosphere in Bioastronautics data book, edited by Parker JF, West VR, and edn. Washington, DC: NASA sp.3006.

4. Dejour P (1968). Respiration, New York, Oxford University Press, pp.10-19.

5. Majesty's Stationary Office (1991). Handbook of Aviation Meteorology, London: hmso.

6. International Civil Aviation Organization (1994). Manual of the ICAO Standard Atmosphere, 2nd ed, Montreal ICAO.

7. Antosia RE, Partrige RA, and Virk AS (1995). Air bag safety. Annals Emerg Med; 25(6): 794-8.

8. Cooper DC, La Vaila PH, and Stoffel RC (1995). Search and rescue. In: Auerbach P, editor: Wilderness Medicine, St Louis.

9. Hall HL, et al. (1994). Surveillance for emergency events involving Hazardous substance. United States, 1990-1992 MMWR CDC Surveillance Summeries; 43(2): 1-6.

10. Karmy-Joes R, et al. (1994). Bomb related injuries. Military Medicine; 159(7): 536-9.

11. Mellor SG (1992). The relationship of blast loading to death and injury from explosion. World Surg; 16(5): 893-8.

12. Sanders MJ (1994). Mosyb's Textbook, St Louis.

13. King PF (1979). The Eustachian tube and its significance in flight. Journal of Laryngology; 93: 659-78.

14. Pearlman HB (1997). Normal tubal function. Archives of Otolaryngology, Chicago; 86: 632.

۱۵. اشکال و جداول متن از کتاب Aviation Medicine (Ernesting) چاپ ۱۹۹٤ اقتباس شده‌اند.