פיזיולוגיה של מערכת הנשימה

תהליך הנשימה

פעולת הנשימה נקראת אוורור. בפעולת הנשימה האוויר נע בתוך דרכי הנשימה מהאוויר שמחוץ לגוף אל נאדיות הריאה, ובכיוון ההפוך. מטרת הנשימה היא חמצון הדם בריאות כדי להעביר את החמצן לרקמות וכן סילוק פחמן דו־חמצני מכלי הדם לריאות. לתהליך הנשימה כולו ארבעה תפקידים:

- **התפקיד הראשון -** אוורור. כלומר הכנסת חמצן אל הריאות והוצאה של פחמן דו־חמצני מהריאות.
- **התפקיד השני -** מעבר החמצן מנאדיות הריאה לדם, ומעבר פחמן דו־חמצני מהדם אל הנאדיות.
- **התפקיד השלישי -** העברת החמצן מהדם לרקמות, וקבלת פחמן דו־חמצני מהרקמות לדם.
- **התפקיד הרביעי -** בקרה, כמו כל תהליך אחר בגוף.

הפיזיולוגיה של הנשימה מבוססת על הפרשי לחצים. הלחץ מחוץ לגוף נקרא לחץ אטמוספרי (atmospheric pressure) והוא נמדד במ"מ כספית (mmHg, ממ"כ). הלחץ האטמוספרי בגובה פני הים עומד על 760ממ"כ. הלחץ בין קרומי הפלאורה (intrapleural pressure) נמוך יותר ובאופן תקין נמצא בטווח של 457-157Hmm. על כן, קרומי הפלאורה הפנימית והחיצונית צמודים זה לזה. הלחץ בנאדיות (intra pulmonic pressure) תלוי בשלב של תהליך הנשימה, שאיפה או נשיפה, אך מכיוון שהנאדיות פתוחות לאוויר, הלחץ בהן שואף להיות כמו הלחץ האטמוספרי 760ממ"כ.

תהליך הנשימה מחולק לשני שלבים: כניסת אוויר או שאיפה (inspirium) ויציאת האוויר או נשיפה (expirium). תהליך הנשימה מתחלק לנשימה חיצונית ולנשימה פנימית. הנשימה החיצונית (external respiration) מתרחשת בין הנימים לנאדיות, והנשימה הפנימית (internal respiration) מתרחשת בין רקמות הגוף לנימים. האוורור תלוי בהפרשי הלחצים הנובעים משינוי נפח בית החזה. השרירים המשתתפים בתהליך הנשימה הם הסרעפת, שאחראית על אורך חלל בית החזה (מלמעלה למטה), והשרירים הבין־צלעיים, האחראים על ההיקף של בית החזה (לצדדים, קדימה ואחורה).

שאיפה (inspirium) - תהליך השאיפה, כניסת האוויר, הוא תהליך אקטיבי. השרירים הבין־צלעיים מתכווצים והצלעות נעות הצידה ומעלה (כלפי חוץ); הסטרנום אף הוא עולה, הסרעפת מתכווצת ומשתטחת כלפי מטה. ועקב תנועות אלו נפח בית החזה גדל. קרום הפלאורה החיצוני נמתח יחד עם בית החזה וקרום הפלאורה הפנימי נמתח איתו בגלל הריק ביניהם. הנפח של הנאדיות גדל והלחץ בנאדיות יורד. ההפרש השלילי בין הלחץ האטמוספרי בחוץ (754 ממ"כ) ללחץ בנאדיות (כ־759 ממ"כ) גורם לכניסת אוויר לנאדיות עד השוואת הלחצים. כשהלחץ בנאדיות שווה ללחץ האטמוספרי בחוץ, השאיפה נפסקת.

נשיפה (expirium) - תהליך הנשיפה, הוצאת אוויר, הוא תהליך פסיבי. שרירי הנשימה (השרירים הבין־צלעיים והסרעפת) מתרפים, הצלעות יורדות, הסרעפת עולה ונפח בית החזה קטן. הנפח הקטן "סוחט" את נאדיות הריאה, שעכשיו הלחץ בהן גבוה מהלחץ האטמוספרי בחוץ (הלחץ בנאדיות כ־759 ממ"כ). הפרש לחצים חיובי זה גורם לתנועת אוויר החוצה עד שהלחץ בנאדיות יורד חזרה ל־764 ממ"כ. השינוי הקטן הזה בלחץ (1-4 ממ"כ, לפי הנשיפה או השאיפה) מספיק כדי להזרים חצי ליטר אוויר פנימה והחוצה בשתי שניות, בנשיפה או בשאיפה (תרשים 3.1).

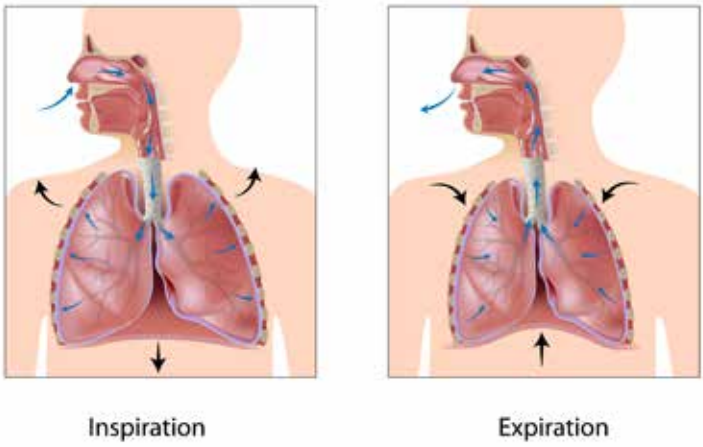
היענות (Compliance) הריאות

היענות הריאות היא מידת הגמישות של רקמת הריאה הנמתחת ומתכווצת עם תנועות הנשימה. ככל שהיענות רקמת הריאה טובה יותר כך צריך להשקיע פחות כוח (אנרגיה) בתהליך הנשימה. במצב רגיל ההיענות גדולה יחסית. לעומת זאת, בעת מחלה ההיענות של הריאות יורדת ונדרשת יותר אנרגיה עבור תהליך הנשימה. באדם בריא הנשימה דורשת רק 3% מכלל האנרגיה של הגוף, אך עם הירידה בהיענות האנרגיה הדרושה לנשימה יכולה להגיע עד 33% מכלל אנרגיית הגוף. גורמים שעלולים לגרום לכך הם: הרס הסורפקטנט, תמט ריאתי, עלייה בהתנגדות דרכי האוויר וכדומה.

כל תנועה של גז או נוזל בתוך צינור כרוכה ביצירת התנגדות לזרימה. כדי שהגז או הנוזל ינועו יש להשקיע אנרגיה. התנגדות דרכי האוויר לזרימת האוויר (airways resistance) מחולקת כך שכ־50% מההתנגדות מקורה בחלל האף, 20%-30% מההתנגדות מקורה בשאר דרכי האוויר, ובעת מאמץ, יכולה לעלות ל־50%. מצד אחד, ההתפצלויות של הסימפונות מקטינות את ההתנגדות עקב הגדלת שטח החתך הכללי של כלי הנשימה, ומצד שני, הפרשה מוגברת של ריר (mucus) או התכווצות הסימפונות מגבירות את ההתנגדות ויש להשקיע יותר אנרגיה בביצוע הנשימה. הפרש הלחץ שבין חלל הפלאורה לנאדיות הוא זה ש"מאיים" למוטט את הריאות. ללחץ זה קוראים recoil pressure.

סרטון 7. פעולת הנשימה

בסרטון אפשר לראות את עבודת השרירים הבין־צלעיים והסרעפת ואת התרחבות והתכווצות חלל בית החזה בזמן שאיפה ובזמן נשיפה.



איור 3.11 השוואה בין שאיפה לנשיפה

בשאיפה (ציור שמאלי) - אוויר נכנס לריאות ← השרירים הבין־צלעיים מתכווצים ← הצלעות נעות הצידה ולמעלה ← הסרעפת מתכווצת ויורדת מטה ← נפח חלל בית החזה גדל ואיתו גדל גם הנפח בחלל הנאדיות ← הלחץ בנאדיות קטן ← אוויר נכנס לנאדיות ומתבצע שחלוף הגזים.

בנשיפה (ציור ימני) - השרירים הבין־צלעיים מתרפים ← הצלעות יורדות ← הסרעפת מתרפית ועולה מעלה ← נפח בית החזה קטן ואיתו קטן גם הנפח בחלל הנאדיות ← הלחץ בנאדיות עולה ← אוויר יוצא לסביבה החיצונית.

נפחי הנשימה

קצב הנשימה התקין הוא 12-20 נשימות בדקה. נפח נשימה יחידה נקרא נפח חילופי (tidal volume) והוא בממוצע כ־500 מ"ל (כ־10 מ"ל לק"ג). שחלוף הגזים מתבצע רק בברונכיולים הטרמינלים ובנאדיות הריאה, ולכן חלק מהאוויר הנמצא בדרכי האוויר, כ־150 מ"ל אוויר (20%), אינו משתתף בנשימה בנאדיות. נפח זה נקרא נפח אנטומי מת (anatomical dead space) מכיוון שזהו נפח אנטומי שאינו מבצע תחלופת גזים. נוסף על כך, במקרה של פציעה או מחלה, עלול להיגרם מצב שבו חלק מהנאדיות לא יהיו פעילות. במקרה זה גם האוויר בנאדיות הפגועות לא ישתתף בשחלוף הגזים. כלל נפח האוויר שאינו משתתף בתחלופת הגזים נקרא נפח פיזיולוגי מת (physiological dead space). בדרך כלל, כשהנאדיות בריאות ונפח האוויר בנאדיות שאינו משתתף בתחלופת הגזים קרוב לאפס, אזי הנפח הפיזיולוגי המת קרוב לנפח האנטומי המת. לעומת זאת, בעת מחלה או הרס מתמשך של רקמת הריאות, כשהנאדיות נסתמות או נהרסות, הנפח הפיזיולוגי המת יכול להיות עד פי עשרה מהנפח האנטומי המת.

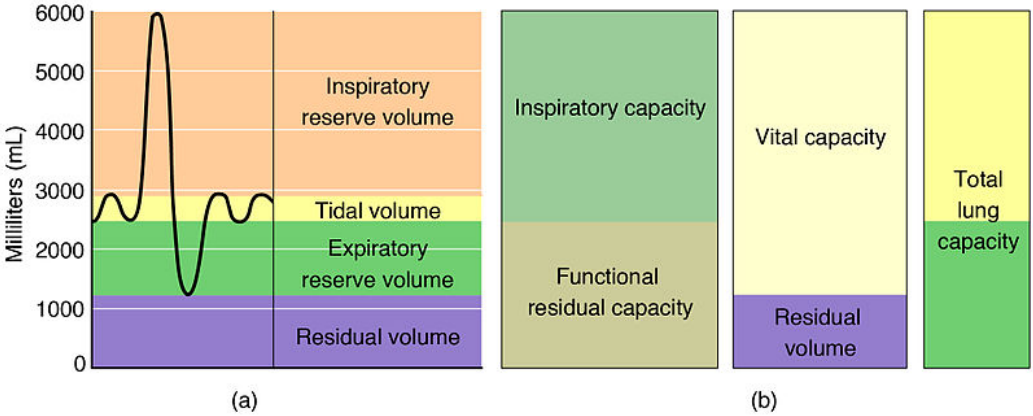
כבר מהנשיפה הראשונה הריאות של האדם אינן ריקות לחלוטין. גם אם הוא נושף החוצה בכוח את האוויר תמיד ייוותר נפח אוויר מסוים בריאות, שמטרתו למנוע קריסה של הנאדיות. זהו נפח אוויר הנקרא נפח שאריתי (residual volume) וגודלו 1,000-1,200 מ"ל. בכל נשימה מתחלף חלק מאוויר זה. כל 16 נשימות (בערך) האוויר של הנפח השאריתי מתחלף.

בשאיפה אחת רגילה אדם מכניס בממוצע כחצי ליטר אוויר לריאות (ומתוך זה רק 350 מ"ל בנאדיות), אך למעשה קיבולת הריאה היא 4-6 ליטר, כלומר פי 8 יותר מנפח נשימה רגילה. הנפח המרבי שנכנס בשאיפה מאומצת נקרא העתודה השאיפתית (inspiratory reserve volume) ונפחו 2,000-3,000 מ"ל בממוצע.

חשוב להדגיש שזה אחרי שאיפה רגילה, כלומר נוסף על נפח נשימה רגיל (tidal volume)//נפח חלופי (tidal volume). האוויר שיוצא בנשיפה מאומצת (לאחר שאיפה רגילה) נקרא העתודה הנשיפתית (expiratory reserve volume) ונפחו כ־1,200 מ"ל.

בעזרת הנפחים הבסיסיים אפשר להגדיר נפחים נוספים. שאיפה רגילה בתוספת שאיפה מאומצת תיתן את נפח האוויר בשאיפה מקסימלית (inspiratory capacity), 3,500 מ"ל בממוצע. כמות האוויר שיש בדרך כלל בריאות היא הנפח אחר שאיפה רגילה - כ־2,300 מ"ל - נפח זה הוא הקיבולת השארית התפקודית (functional residual capacity).

תנועת האוויר בנשימה עמוקה אצל גבר ממוצע היא כניסה של שאיפה מאומצת (3,500 מ"ל), יציאה של נפח אוויר זה כולל נפח האוויר בנשיפה מאומצת (שזה עוד כ־1200 מ"ל) ומתקבלים 4,600-4,700 מ"ל הנקראים הקיבולת החיונית (vital capacity), ובתוספת נפח האוויר הקבוע בריאות נקבל את קיבולת הריאות הכוללת (total lung capacity): 5,800 מ"ל. נפחים אלו קטנים בכ־25% בקרב נשים, וגדולים יותר בקרב אנשים רחבים או אתלטים. חשוב שהצוות הרפואי יכיר הגדרות אלו כדי לבצע בדיקת תפקודי נשימה ולקבל ערכים מדידים שאותם אפשר להשוות וכן כדי לזהות פתולוגיות בתפקודי הריאות.



תרשים 3.1 נפחי הריאות

בתרשים רואים את נפחי הריאות בצורה גרפית. אפשר לראות כיצד חיבור של נפחים בסיסיים יוצר נפחי נשימה נוספים.

תחלופת האוויר מרשימה, וכמו במחזור הדם, לתדירות התחלופה יש משמעות לא פחותה מאשר לנפח. יעילות הנשימה מורכבת משילוב של נפח הנשימה וקצב הנשימה. נפח נשימה/שאיפה תקין הוא כ־500 מ"ל וקצב נשימה תקין הוא 10-12 נשימות בדקה. מכאן שנפח לדקה (minute volume) הוא 5-6 ליטר לדקה בממוצע. חשוב לזכור שלא כל הנפח הזה משתתף באוורור שבנאדיות. כדי לחשב את הנפח המשתתף באוורור יש להפחית את הנפח האנטומי המת מנפח הנשימה הרגיל, ורק אז להכפיל בקצב. כך מתקבל נפח אוורור נאדיות בדקה (minute alveolar ventilation).

לא כל האוויר שיש בנאדיות יעיל ונצרך על ידי הגוף. גוף האדם זקוק לחמצן בלבד. האוויר שאנו נושמים מורכב מ: 78.62% חנקן, 20.84% חמצן, 0.50% פחמן דו־חמצני ועוד 0.04% אדי מים (יש גזים נוספים אך זניחים בכמותם ובחשיבותם). לחץ האוויר בגובה פני הים הוא אטמוספרה אחת ששווה ל־760 ממ"כ, נגדיר זאת כ־100% מהלחץ.

כל אחד מהגזים בתערובת נותן את החלק שלו בלחץ לפי חלקו בנפח. החנקן תורם 78.62% מהלחץ (כ־598 ממ"כ) החמצן 20.84% (כ־159ממ"כ) וכן הלאה. התרומה של כל גז ללחץ הכולל נקראת הלחץ החלקי (partial pressure). את הלחץ החלקי מודדים ביחידת המידה טור (torr), שבה 1 טור שווה ל־1ממ"כ. לחץ חלקי מסומן באות p לפני שם הגז. לדוגמה, לחץ חלקי של חמצן יסומן pO_2.

האוויר שאנו נושמים לח יותר מן האוויר שמחוץ לגוף (האוויר נעשה לח וחם בדרכי האוויר), משמעות הדבר היא שאוויר זה מכיל יותר אדי מים. נוסף על כך, הגוף מנצל את החמצן, פעולה שמקטינה את ריכוזו. בכל שאיפה יש בריאות גם אוויר שנשאר מהשאיפה הקודמת, זהו הנפח השאריתי (residual volume) ותפקידו לשמור שהריאות לא יתרוקנו לחלוטין. לחץ האוויר בנאדיות הוא אומנם 760 טור (100%), אך הלחץ החלקי של הגזים שונה. חנקן - 569 טור (74.9%), חמצן - 104 טור (13.7%), פחמן דו־חמצני - 40 טור (5.2%) ואדי מים - 47 טור (6.2%). כמות אדי המים מדללת את שאר הגזים.

מפל לחצים ותפקידו בדיפוזיית הגזים בריאה

חילוף הגזים בין האוויר בנאדיות ובין הגזים שבנימיות הדם נעשה לפי מפל הלחצים ולפי חוקי הדיפוזיה. יש מספר עצום של נימים ריאתיים, ולכל נים יש דופן דקה משותפת לו ולנאדית - צימוד זה הוא המאפשר דיפוזיה. הדם המגיע מהלב לריאות עני ב־O_2 ועשיר ב־CO_2. הלחץ החלקי של החמצן בדם המגיע לריאות הוא 40 ממ"כ, ובאוויר הנאדיות הוא כ־100 ממ"כ. על כן, תהיה דיפוזיה של חמצן מהנאדית לדם עד השוואת לחצים, כלומר עד שהלחץ החלקי של החמצן בדם העוזב את הנאדית יהיה גם הוא 100 ממ"כ. תהליך זה נמשך כשלושת רבעי השנייה. הדם המגיע בנימים אל הנאדיות מכיל פחמן דו־חמצני pCO_2 בלחץ חלקי של 45-50 ממ"כ, ואילו בנאדיות יש לחץ חלקי של פחמן דו־חמצני של 40 ממ"כ. על כן, תהיה דיפוזיה של פחמן דו־חמצני מהדם אל הנאדיות. דיפוזיית ה־CO_2 מהנאדיות ואליהן מהירה פי כמה וכמה מדיפוזיית ה־O_2, ולכן מספיק ל־CO_2 מפל לחצים קטן כדי לעבור.

טבלה 3.1 הרכב האוויר הנשף והנשאף במצבים שונים

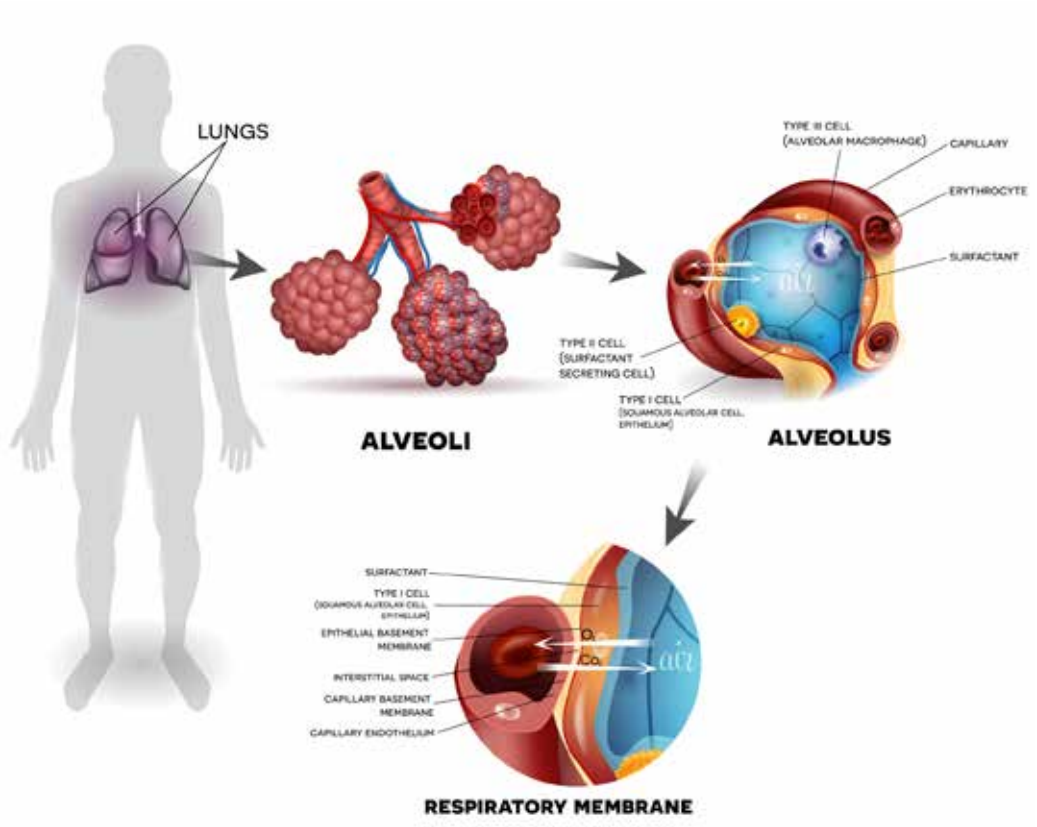
הרכב האוויר הנשם/הנשאף	הרכב האוויר הנשף	הרכב האוויר בנאדיות
O_2 - 21% חמצן	O_2 - 16% חמצן	O_2 - 14% חמצן
CO_2 - 0.5% פחמן דו־חמצני	CO_2 - 5% פחמן דו־חמצני	CO_2 - 7% פחמן דו־חמצני
N_2 - 78% חנקן	N_2 - 79% חנקן	N_2 - 79% חנקן

שחלוף הגזים

מעבר הגזים בין הנאדיות לדם מתבצע בדיפוזיה, ולכן ריכוז הגז, וליתר דיוק, הלחץ החלקי של כל גז, הוא חשוב. גז עובר ממקום שבו הלחץ החלקי שלו גבוה למקום שבו הלחץ החלקי שלו נמוך יותר. מעבר הגזים תלוי בהפרש הלחצים החלקי של החמצן והפחמן הדו־חמצני בנאדיות ובדם. הדם בנאדיות מגיע מהגוף, שם סיפק חמצן לרקמות (הלחץ החלקי של החמצן בדם ירד) וקיבל פחמן דו־חמצני (הלחץ החלקי שלו עלה). הלחץ החלקי של הגזים בדם תלוי בפעילות הגוף. כמות החמצן הנצרכת גדולה מכמות הפחמן הדו־חמצני שנוצר. נפח הנשיפה קטן במקצת מנפח השאיפה. במנוחה, צריכת החמצן של הגוף כולו היא כ־250 מ"ל לדקה, וכמות הפחמן הדו־חמצני שנוצר הוא כ־200 מ"ל לדקה. נפח תחלופת האוויר בדקה הוא כ־5 ליטר בדקה, מתוכם 1 ליטר חמצן. 200 מ"ל מנוצלים ו־800 מ"ל יינשפו החוצה.

גורמים המשפיעים על דיפוזיה של גזים הם:

- הפרשי לחץ חלקי (הפרש ריכוז)
- מסיסות במים (ביחס ישיר ללחץ החלקי)
- שטח החתך של הדיפוזיה (שטח פנים)
- משקל (גודל מולקולרי) הגז
- טמפרטורה
- עובי קרום (ממברנה) הנאדיות והנימים (מרחק דיפוזיה)



איור 3.12 חילוף הגזים בנאדיות הריאה

בתמונה רואים את חילוף הגזים בנאדיות הריאה ואת השכבות שאותן תפגוש מולקולת חמצן בדרכה מהריאה לדם. הקרום הנשימתי (respiratory membrane): סורפקטנט ← אפיתל ← basement membrane (עד כאן שכבות קיר הנאדית) ← נוזל בין־תאי ← basement membrane ← אנדותל (שכבות קיר הנים).

סרטון 8. חילוף הגזים בנאדיות

המרחק שאוויר צריך לעבור בדיפוזיה הוא קיר הנים (הכולל אנדותל ו־basement membrane), נוזל בין־תאי וקיר נאדית הריאה (סורפקטנט, אפיתל, basement membrane). לשכבות אלה יחד קוראים הקרום הנשימתי (respiratory membrane) (איור 3.12). קוטר הנים הצמוד לנאדית הוא 5 מיקרומטר, וקוטר תא דם אדום הוא 7 מיקרומטר. במעברו בנים נדחס תא הדם האדום ונדבק לדופן הנים ובכך נחסך המעבר בשכבת הפלזמה. יתרון נוסף הוא ניצול מלא של שטח הפנים של תאי הדם האדומים ושל הנים והנאדיות. שתי עובדות אלה מגבירות את יעילותה של הדיפוזיה. מסתבר שהדיפוזיה אכן יעילה: הלחץ החלקי של הגזים בדם העוזב את הנאדיות

קרוב מאוד ללחצם החלקי בנאדיות עצמן (80-100 טור לחמצן, 35-40 טור לפחמן דו־חמצני). למעשה, לחץ החמצן בדם מגיע קרוב ל־100 טור כבר אחרי שליש הדרך בנים.

גורם נוסף שמשפיע על הדיפוזיה הכוללת הוא שטח הפנים של כלל הנאדיות. ככל שיש פחות שטח פנים, וליתר דיוק, פחות שטח הפנים הבא במגע עם שטח פנים של נימי הדם, תהיה פחות דיפוזיה, כלומר פחות חמצן יעבור לדם. ירידה בשטח הפנים הכללי יכולה לקרות בגלל ירידה בשטח הפנים של הנאדיות או בשל ירידה בשטח הפנים של תאי דם אדומים הזמינים לקליטת חמצן.

דוגמה למצב שבו שטח הפנים של הנאדיות יורד היא אמפיזמה (emphysema). במצב זה, דופנות הנאדיות נהרסים והנאדיות מתמזגות זו עם זו לכדי חלל גדול. בשל כך יש הפחתה במספר הנאדיות שמשתתפות בשחלוף הגזים. לדוגמה, שלוש נאדיות מתמזגות יחד לנאדית אחת הגדולה כמו שלוש. אומנם אין ירידה בנפח האוויר בנאדיות, אך יש ירידה בשטח הפנים שלהן.

קיבולת הדיפוזיה (diffusion capacity) - היא כמות החמצן שעוברת בדיפוזיה מהנאדיות לדם. בנשימה רגילה, מדובר בכ־21 מ"ל חמצן בדקה לכל מ"מ כספית (ממ"כ). בעת מאמץ, עקב פתיחה והרחבה של הנימים, הערך עולה ל־65 מ"ל. הפרש הלחצים בין הנאדיות לדם הוא בדרך כלל 11 ממ"כ. כמות החמצן שעוברת בדיפוזיה בדקה אחת היא 21 x 11 = 231 מ"ל.

לצורך תחלופת גזים יעילה צריך לא רק אוורור נאדיות (V_A) טוב אלא גם זרימת דם (Q) טובה, ועליהם לבוא יחדיו. זרימת דם לנאדיות ללא אוורור ולחלופין, אוורור נאדיות שלא מגיע אליהן דם, הם שני מצבים לא יעילים. עיקרון זה נקרא יחס אוורור פעפוע (ventilation-perfusion ratio - V_A/ Q) והוא מייצג את היחס בין זרימת האוויר לזרימת הדם. שינויים ביחס זה (לכיוון אפס או לכיוון אין־סוף) יובילו למצב שבו אין תחלופת גזים. אם היחס נמוך, כלומר יש זרימת דם גבוהה עם אוורור נאדיות נמוך, אזי הדם זורם אך אינו מתאוורר. מצב זה שבו הדם זורם בנאדיות ויוצא כלעומת שנכנס נקרא שאנט (דֶלֶף) פיזיולוגי (physiological shunt). אם היחס גבוה, כלומר יש אוורור נאדיות גבוה אבל ללא הגעת דם, אזי הנאדיות מתמלאות אוויר, אך אוויר זה לא בא במגע עם דם. מצב זה נקרא שטח פיזיולוגי מת (physiological dead space). הדם, בהיותו נוזל, נוטה לרדת כלפי מטה. האוויר, בהיותו גז, נוטה לעלות כלפי מעלה. ככל שיורדים בריאות, כך היחס בין האוורור לזרימה נעשה קטן יותר. החלק העליון של הריאות נוטה להיות שטח פיזיולוגי מת, והחלק התחתון נוטה להיות שאנט פיזיולוגי.

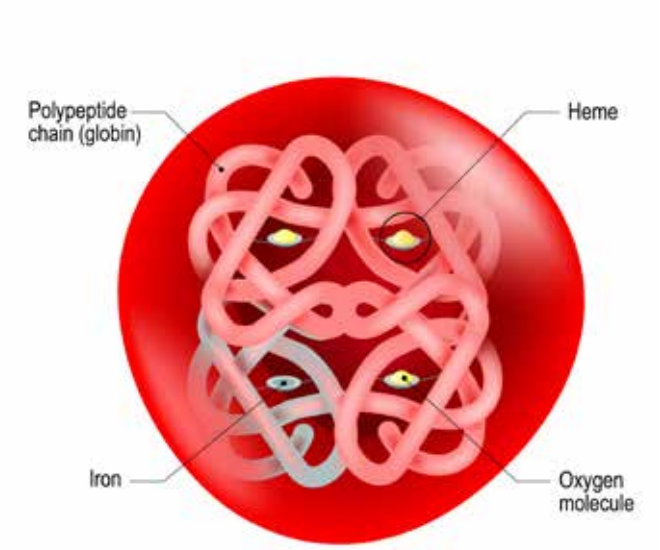
הסעת הגזים בדם

מעבר הגזים נעשה בדיפוזיה. על כן, תנאי בסיסי למעבר זה הוא שיהיה בנאדיות לחץ חמצן גבוה יותר מאשר בדם. הדם המגיע מהגוף לריאות מכיל חמצן בלחץ חלקי של 40 טור, והלחץ בנאדיות הוא 104 טור. לכן, החמצן עובר מהנאדיות לדם והדם יוצא מהנאדית בלחץ חלקי של חמצן בסביבות 100 טור.

החמצן נישא בדם על חלבון שנמצא בתאי הדם האדומים ושמו המוגלובין (hemoglobin: Hb). במולקולה אחת של המוגלובין יש מקום לארבע מולקולות של חמצן (איור 3.13). יכולת הנשיאה של חמצן בהמוגלובין נזקפת לזכותו של אטום ברזל המקנה להמוגלובין, ובעקבות כך גם לתאי הדם האדומים ולדם בכלל, את צבעו האדום ואת טעמו המתכתי. שיעור ההמוגלובין הקשור לחמצן נקרא רוויון החמצן (oxygen saturation). אם כל ארבעת אתרי הקשירה בכל מולקולות ההמוגלובין תפוסות בחמצן זהו רוויון חמצן של 100%. רוויון מלא מתקבל בלחץ חמצן של 80-100 טור, וההמוגלובין נקרא המוגלובין רווי (fully-saturated Hb). שיעור הרוויון באדם בריא הוא 95%-100%. כמות החמצן המועברת בדם היא 0.3 מ"ל לכל 100 מ"ל דם. בלחץ 100 טור (רוויון מלא) 2% מהחמצן מומס בפלזמה, ושאר החמצן, 98%, נישא על גבי ההמוגלובין בתאי הדם האדומים.

זיקה - היא יכולת הקישור של חומר אחד לחומר אחר. קשירתו של החמצן להמוגלובין נובעת מהזיקה של המוגלובין לחמצן. ככל שהזיקה גבוהה יותר, כך יותר חמצן נקשר להמוגלובין. בלחץ חמצן של 10 טור רוויון ההמוגלובין הוא 10%. בלחץ חמצן 60 טור רוויון ההמוגלובין הוא 90%. עלייה מהירה בקישוריות החמצן להמוגלובין בטווח קצר נובעת משינוי זיקת ההמוגלובין לחמצן המתרחשת לאחר קשירתו של החמצן. כשחמצן נקשר להמוגלובין ההמוגלובין עובר שינוי המגביר את זיקתו לחמצן. לכן, מספיק לחץ של 60 טור כדי שיהיה חמצון מספק של הדם. הערך התקין הוא 95%-100% (לחץ של 80-100 טור). דם ורידי המגיע לריאות בלחץ חמצן חלקי של 40 טור, מספק רוויון של 75%.

הלחץ החלקי של החמצן נובע מהחמצן המומס בפלזמה. החמצן הקשור להמוגלובין משפיע על הלחץ החלקי. הדיפוזיה מהנאדיות מתבססת על הלחץ החלקי של החמצן בפלזמה. החמצן מגיע לפלזמה ומייד נקשר להמוגלובין. למעשה, ההמוגלובין "שואב" את החמצן מהפלזמה ובכך משאיר את הלחץ החלקי של החמצן בפלזמה נמוך - מצב שמגביר את הדיפוזיה של החמצן מהנאדיות.



איור 3.13 מבנה מולקולת ההמוגלובין

מולקולת ההמוגלובין מכילה ארבעה אתרי קשירה למולקולות חמצן. אתרי קשירה אלה הם מולקולות הברזל. אפשר לראות את מולקולת החמצן (oxygen molecule - צהובה בתמונה) נישאות על ידי אטומי ברזל (heme).

בקצה העורקי של נים לחץ החמצן הוא 100 טור. לחץ החמצן בנוזל הבין־תאי הוא כ־40 טור. בתאים עצמם לחץ החמצן הוא 5-40 טור (לפעילות חיים די ב־1-3 טור חמצן). היות שהתאים מנצלים את החמצן, רמת החמצן בתוך התאים נשארת נמוכה. לפי כללי הדיפוזיה, חמצן עובר מהדם לנוזל הבין־תאי, ומהנוזל הבין־תאי לתאים עצמם ש"שואבים" את החמצן. כשהדם מגיע לקצה הווריד בנים רמת החמצן בו משתווה לרמה בנוזל הבין־תאי - 40 טור.

פחמן דו־חמצני עובר מהתאים לדם. הדיפוזיה של הפחמן הדו־חמצני מהירה פי 20 מזו של החמצן, ולכן מספיק הפרש לחצים קטן יותר כדי לגרום לדיפוזיה מספקת. בתוך התא רמת הפחמן הדו־חמצני היא 46 טור, ובנוזל הבין־תאי 45 טור. בדם העורקי רמת הפחמן הדו־חמצני היא 40 טור. כשהפחמן הדו־חמצני חוצה את הנים הוא מספיק להשוות את רמתו עם הרקמות והוא יוצא כדם ורידי עם לחץ פחמן דו־חמצני של 45 טור. בנאדיות הפחמן הדו־חמצני 46 טור. למעשה כבר בשליש מהדרך (ומהזמן) בנאדיות, הדם נפטר מעודף הפחמן הדו־חמצני ויוצא מהנאדיות כדם עורקי המכיל רק 40 טור לחץ של פחמן דו־חמצני (המונחים 'דם עורקי' ו'דם ורידי' במחזור הדם הגדול והקטן יוסברו בהמשך).

טבלה 3.2 הרכב הדם

	דם עורקי	דם ורידי	לחץ בנאדיות	לחץ בחוץ
P_{O_2}	100 ממ"כ	40 ממ"כ	104 ממ"כ	160 ממ"כ
P_{CO_2}	40 ממ"כ	45 ממ"כ	40 ממ"כ	4 ממ"כ

המונחים "דם עורקי" ו"דם ורידי" מתייחסים לדם במחזור הדם הגדול.
במחזור הקטן (מחזור הריאה) בעורקים יש "דם ורידי" ובווריד יש "דם עורקי".

נשיאת פחמן דו־חמצני בדם - הפחמן הדו־חמצני מגיע לדם בעקבות מטבוליזם של תאי הגוף. הפחמן הדו־חמצני נישא בדם בשלוש צורות: מומס בפלזמה (8%), בחלבוני הדם (20%) וכיון קרבונט HCO_3^- (72%). מקדם המסיסות של פחמן דו־חמצני במים הוא גבוה מזה של חמצן, ולכן הוא מומס ביתר קלות בפלזמה. חלק נכבד מהפחמן הדו־חמצני נישא על גבי חלבונים שונים בדם, כולל המוגלובין. למעשה, להמוגלובין חופשי (ללא חמצן) יש זיקה גבוהה יותר לפחמן דו־חמצני מאשר לחמצן. רוב הפחמן הדו־חמצני נישא בפלזמה כיון קרבונט על פי התגובה הכימית שלהלן:

$$H_2O + CO_2 \leftrightarrows H_2CO_3 \leftrightarrows HCO_3^- + H^+$$

בתאי הדם האדומים יש אנזים המזרז את התהליך של הפיכת פחמן דו־חמצני ליון קרבונט. שמו של האנזים הוא קרבוניק אנהידראז (carbonic anhydrase=CA). עלייה בריכוז הפחמן הדו־חמצני תוביל לעלייה בריכוז יוני המימן, שפירושה עלייה בחומציות. בזמן הנשיפה, כשהגוף מאבד פחמן דו־חמצני וריכוזו בדם יורד, קורה תהליך הפוך וריכוז יוני המימן יורד - ואיתו גם רמת החומציות. לכן, למערכת הנשימה תפקיד חשוב ביותר במאזן חומצה־בסיס בגוף. כאן רואים הבדל נוסף בין דם עורקי לדם ורידי. דם עורקי, העני בפחמן דו־חמצני, בעל רמת חומציות של pH=7.41. לעומתו, הדם הווורידי שעשיר בפחמן דו־חמצני, חומציותו עולה ורמתה pH=7.37 (רמת החומציות היא ביחס הפוך למדד pH, כלומר רמת חומציות גבוהה שקולה ל־pH נמוך, ולהפך).

כמות החמצן הנישאת בדם תלויה גם בכמות החמצן שצורך הגוף. על פי חוק פיק (Fick's principle), כמות החמצן העובר מהריאות לדם נמצאת ביחס ישיר לכמות החמצן שהגוף צורך. יישום מעשי חשוב לחוק זה הוא שאפשר לחשב כמה חמצן הגוף צורך על פי הפרש החמצן בין האוויר הנשאף לאוויר הנשף.

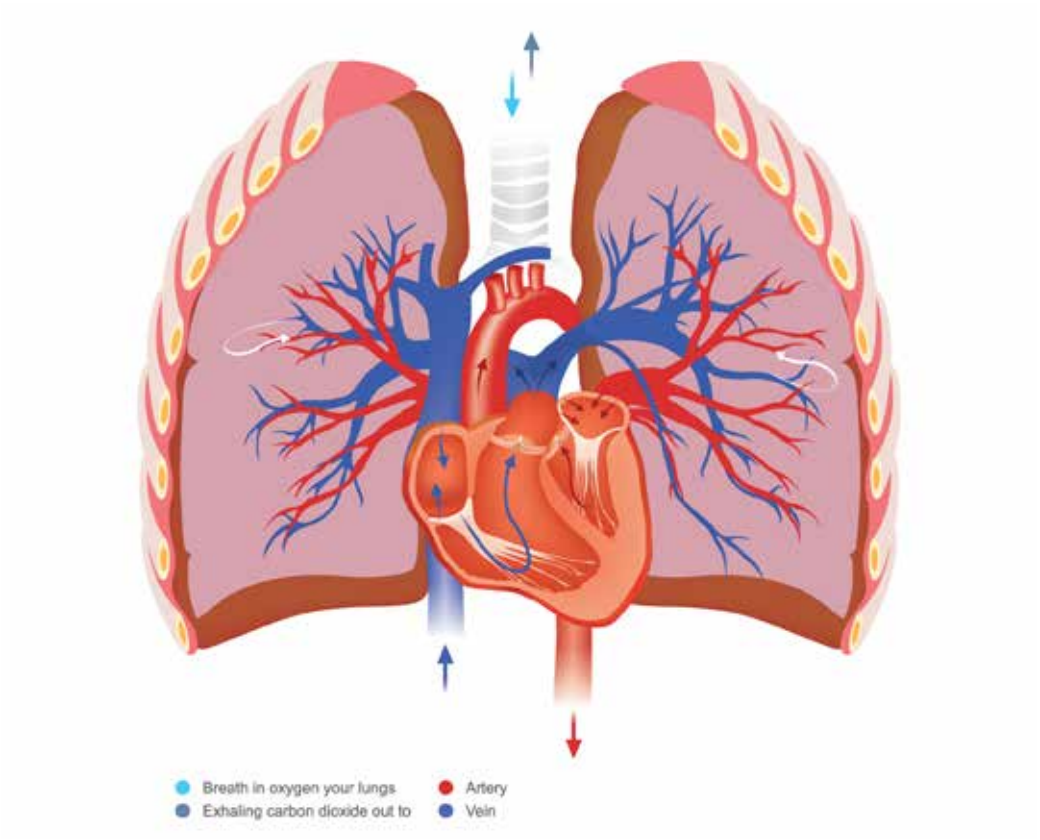
תנאים לתנועה וניצול חמצן כראוי כוללים:

- כמות מספקת של חמצן לחמצון ההמוגלובין (קשור ל: נתיב אוויר פתוח, לחץ חלקי של חמצן גבוה מספיק, מינימום הפרעות לדיפוזיה בנאדיות)
- זרימה של הדם לרקמות (קשור ל: תפוקת הלב, נפח הדם, זרימה ללא הפרעות בכלי הדם)
- יכולת תא הדם האדום לפרוק ולטעון חמצן (קשור ל: רמת המוגלובין תקינה, הנעת המוגלובין מחומצן לרקמות הנצרכות, אפשור דיפוזיה לתאים, הומאוסטאזיס כללי).

מצב שבו כמות החמצן בדם נמוכה מדי נקראת היפוקסמיה (hypoxemia). כמות חמצן נמוכה ברקמות נקראת היפוקסיה (hypoxia). לדם כמה צבעים (הרחבה על מערכת הדם ראו בפרק 6). צבעו של הדם נגרם ממולקולת ההמוגלובין, וליתר דיוק, מיון הברזל שבו. ברזל מחומצן הוא למעשה ברזל "חלוד", ולכן כאשר ההמוגלובין מחומצן, כמו בדם עורקי, צבע הדם יהיה אדום בהיר. בדם ורידי ההמוגלובין המוחזר נושא פחמן דו־חמצני. צבעו אומנם יהיה אדום, אבל דם ורידי ייצבע באדום כהה. דם ללא חמצן כלל יהיה בצבע כחול, וזהו מקור הכיחלון במקרים של היפוקסמיה או במצב של מטהמוגלובינמיה, כחלת (methemoglobinemia) (להרחבה על מערכת הדם ראו בפרק 6, ולהלן בקצרה).

מחזור הדם הקטן ואספקת הדם לריאות

מהחדר הימני יוצא עורק הריאה (pulmonary artery). עורק זה מתפצל לעורק ימני ולעורק שמאלי הנכנסים בשער הריאה הימנית והשמאלית, בהתאמה. לאחר כניסתם בשער הריאה הם מתפצלים לעורקיקים והלאה לנימים העוטפים את נאדיות הריאה. נימים אלו מתנקזים לווריד‍ונים, ואלה מתנקזים לווריד‍ים. מכל ריאה יוצאים שני ורידים, וארבעת ורידי הריאה (pulmonary veins) האלה מתנקזים לעלייה השמאלית (left atrium). זהו מחזור הדם הקטן (הפולומונרי), מחזור הריאות (איור 3.14). משום שמחזור דם זה הרבה יותר קטן מהמחזור הסיסטמי (הגדול) לחץ הדם בו הרבה יותר נמוך. שלא כמו במחזור הגדול, הדם שבעורקים עני בחמצן, והדם בווריד‍ים הוא הדם המחומצן. כלומר בעורקי הריאה נמצא "דם ורידי" ובווריד‍י הריאה נמצא "דם עורקי".



איור 3.14 מחזור הדם הריאתי (הקטן)

מחזור הדם הריאתי מתחיל בחדר הימני ← ממנו יוצא העורק הריאתי/עורק הריאה (בכחול) ← עורק זה מתפצל לשני עורקי ריאה, אחד לכל ריאה ← מכל ריאה יוצאים שני ורידי ריאה (באדום, שימו לב שבציור רואים רק אחד מכל ריאה) ← ארבעת ורידים אלו מתנקדים לעלייה השמאלית.

מטרת המחזור הקטן, הקרוי גם המחזור הריאתי (pulmonary circulation), אינה העברת חמצן לרקמות, אלא העברת הדם לנאדיות לצורך שחרור פחמן דו־חמצני והטענה מחדש בחמצן. כמו כל רקמה בגוף, גם הריאות צריכות חמצן. מכיוון שעורקי הריאה עניים בחמצן והחמצן בווריד הריאה נועד לגוף, אספקת החמצן לסימפונות ולרקמות התומכות בריאה מגיעה מהמחזור הגדול. ניקוז הדם הווריד לאחר ניצול החמצן נעשה על ידי ורידי הריאה של המחזור הקטן, וכמות הדם החוזרת לעלייה השמאלית גדולה במקצת, בערך 1%-2%, מכמות הדם שיצאה מהחדר הימני. ערבוב הדם הווריד העני בחמצן עם הדם המחומצן מוריד במקצת את הלחץ החלקי של החמצן (והוא עדיין נשאר גבוה).

כ־9% ממחזור הדם נמצא בריאות - 450 מ"ל, מתוכם 70 מ"ל בנימים (נאדיות) והשאר מתחלקים חצי־חצי בין העורקים לווורידים. כמות הדם בריאות אינה קבועה מכיוון שהריאות משמשות מאגר דם גם במצבים פיזיולוגיים תקינים וגם במצבים פתולוגיים. כמות הדם בריאות יכולה להיות 50% עד 200% מהרגיל, לפי הלחץ בחזה. ככל שהלחץ בבית החזה עולה, כך יש פחות דם בריאות.

כמות הדם במחזור הגדול (הסיסטמי) גדולה הרבה יותר מכמות הדם במחזור הקטן (הריאתי). למעבר דם מהמחזור הקטן לגדול יש השפעה גדולה על הריאות, ומנגד השפעה קטנה על הגוף. זרימת הדם בריאות קשורה ישירות לתפוקת הלב. בריאות אין "מערכת ניתוב זרימה" מורכבת כמו במחזור הגדול, שכן יחסית למחזור הדם הגדול, מחזור הדם הקטן פסיבי. כן יש ניווט הדם לנאדיות המחומצנות ביותר. לאוויר, כמו לכל גז, יש נטייה לעלות ועל כן הנאדיות הגבוהות יהיו מאווררות יותר. לעומת זאת הדם, בהיותו נוזל, נוטה לרדת לנאדיות הנמוכות יותר. כדי להשיג את המטרה - אוורור וחמצון הדם - צריך ששניהם יחד יבואו במגע זה עם זה.

אם כמות החמצן באזור מסוים יורדת מתחת ל־70% מהרגיל (לחץ חמצן קטן מ־73 טור), כלי הדם הסמוכים מתכווצים למשך 3-10 דקות. בצורה זו נמנעת זרימת דם לנאדיות לא מחומצנות והדם מופנה לאזורים העשירים בחמצן. מנגנון זה הפוך למנגנון המתקיים בשאר הגוף, שם רקמות בהיפוקסיה גורמות להרחבת כלי דם. ההנחה כיום היא שנאדיות היפוקסיות מפרישות חומר כלשהו המכווץ את כלי הדם באזור (hypoxic pulmonary vasoconstrictor).

אספקת החמצן לנאדיות אינה שווה בכל הריאה וכך גם אספקת הדם. הריאה היא איבר מוארך, כ־30 ס"מ מהנקודה הנמוכה לגבוהה. יש הפרש לחץ הידרוסטטי של 23 ממ"כ, מתוכם 15 ממ"כ מעל הלב ו־8 ממ"כ מתחת ללב. כדי שדם יגיע לאזור מסוים עליו לזרום נגד הלחץ הנגדי שמופעל עליו. לכן לחץ הדם היוצא מחדר שמאל הוא 120 ממ"כ כדי שדם יגיע גם לקודקוד הראש וגם לקצה אצבעות הרגליים. הנימים בנאדיות מתרחבים לפי כמות הדם שמגיעה, לעומת לחץ האוויר בנאדיות שמכווץ את הנימים. אם לחץ האוויר בנאדיות יהיה גדול מדי, הנים ייסתם ולא יתאפשר מעברו של נוזל הדם.

בגלל ההשפעה של שחלוף הגזים באזורים השונים מחלקים את הריאות לכמה אזורים. בבדיקה זו הנבדק נמצא בשכיבת פרקדן בשל היחס בין מקום האזור וגובהו יחסית ללב:

- **אזור 1** (zone 1) - לחץ האוויר בנאדיות תמיד גבוה ואין זרימה של דם בנימים (נפח מת).
- **אזור 2** (zone 2) - יש זרימת דם בזמן סיסטולה, אך הלחץ הדיאסטולי אינו מספיק כדי לדחוף את הדם בנאדיות.
- **אזור 3** (zone 3) - יש זרימת דם תמידית. הלחץ בנאדיות אינו גבוה וגם לחץ דם דיאסטולי מתגבר עליו.

בדרך כלל החלוקה האנטומית היא: אזור 2 בחוד הריאה (apex) ואזור 3 בחלקים הנמוכים של הריאה (החל מ־10 ס"מ מעל הלב, ומטה). במצב תקין לא אמור להיות אזור 1. אזור 1 (שהוא למעשה נפח פיזיולוגי מת) קיים במצב לא תקין, כשלחץ הדם יורד (לדוגמה במצב של הלם) או כשלחץ האוויר עולה (כשלחץ האוויר מוגבר מהרגיל, למשל בגלל חסימת דרכי הנשימה).

לחץ הדם בנימים שסביב נאדיות הריאה הוא בערך 7 ממ"כ (לעומת 17 ממ"כ בנימי הגוף). בתפוקת לב רגילה עומדות לרשות הדם 0.8 שניות לחצות את נימי הנאדיות. עלייה בתפוקת לב יכולה לקצר זמן זה עד 0.3 שניות; קיצור הזמן אינו פוגע בחמצון הדם. הנימים העוטפים את הנאדיות צפופים כל כך עד שלמעשה רואים בהם מרבד נימים (capillary sheet). כמו בגוף, גם בנאדיות נוזל דולף מהנימים לנאדיות. הנימים הריאתיים/ נימי הריאות חדירים יותר מהנימים בגוף, ולכן יותר חלבונים דולפים החוצה (הלחץ הקולואידי בנוזל הבין־תאי בנאדיות הוא כפול מאשר בנוזל הבין־תאי בגוף). חלק מהנוזל מתאדה בנאדיות, וחלקו מתנקז אל הלימפה הריאתית. גם כאן, הלימפה מנקזת נוזלים מהנאדיות. נאדיות רטובות עקב הימצאות נוזל תפליטי או דלקתי לא יוכלו להכיל אוויר. נוסף על כך, אם ריכוז החלבונים יעלה יותר מדי, הנאדיות ייקרעו. אומנם הנאדיות נשארות יבשות, אך האפיתל מספיק חדיר כדי לאפשר לנוזלים לשמור על לחות הנאדיות.

הגורמים המשפיעים על הלחץ החלקי של ה־CO_2 בעורקים

- אוורור יתר, היפרוונטילציה (hyperventilation) - pCO_2 בדם העורקי ירד כאשר קצב פינוי ה־CO_2 בנשימה עולה על קצב הייצור שלו בגוף.
- תת־אוורור (hypoventilation) pCO_2 - בעורק יעלה עקב:

1) ירידה בקצב פינוי ה־CO_2 - בגלל תרופות, חסימה בדרכי נשימה ומחלות ריאה כרוניות כמו ברונכיטיס כרונית (יכול להיות VT תקין עם respiratory rate ירוד).
2) עלייה בקצב ייצור ה־CO_2 - עקב חום גבוה, מאמץ שרירים וצמרמורת.

הגורמים המורידים את הלחץ החלקי של ה־O_2 בעורקים

- בצקת ריאות (pulmonary edema) - במצב זה, נוזל ימלא את הנאדיות ולא אוויר. הצטברות הנוזל עלולה להיווצר בשל אי־ספיקת לב שמאלית, שאיפת רעלים, טביעה וכו'. בעקבות נוכחות הנוזל רמת ה־PaO_2 בעורק תרד אל מתחת 60 ממ"כ. מצב זה הוא היפוקסיה (hypoxia).
- תמט נאדיות (alveoli collapse)/ אטלקטאזיס (atelectasis) - פגיעה זו גורמת לדלף (shunt). כלומר דם עובר בסמוך לנאדיות שקרסו אך אינו עובר חמצון. בשל כך רמת החמצן יורדת ומובילה להיפוקסמיה (hypoxemia) - חוסר חמצן בדם.

כפתרון חלקי למטופלים אלה משתמשים בהנשמה בלחץ חיובי (IPAP - intermittent pressure airways positive). הנשמה זו שומרת על לחץ אוויר חיובי בתוך הנאדיות ומונעת את קריסתן. הנשמה מסוג זה תסייע ליציאת נוזלי הבצקת מחללי הנאדיות, ותפחית את תמט הנאדיות באטלקטאזיס.