

*Dan Cristian Mănescu
Adrian Iacobini
Cătălin Octavian Mănescu*



High Intensity Interval Training

HIIT 2

MODULARE INTEGRARE PERFORMANȚĂ

**Dan Cristian Mănescu
Adrian Iacobini
Cătălin Octavian Mănescu**

HIGH INTENSITY INTERVAL TRAINING

HIIT

MODULARE, INTEGRARE, PERFORMANȚĂ

**Editura RISOPRINT
Cluj-Napoca 2026**

Toate drepturile rezervate autorului & Editurii Risoprint

*Editura **RISOPRINT** este recunoscută de C.N.C.S.
(Consiliul Național al Cercetării Științifice).
www.risoprint.ro www.cncs-uefiscdi.ro*



Opiniile exprimate în această carte aparțin autorului și nu reprezintă punctul de vedere al Editurii Risoprint. Autorul își asumă întreaga responsabilitate pentru forma și conținutul cărții și se obligă să respecte toate legile privind drepturile de autor.

Toate drepturile rezervate. Tipărit în România. Nicio parte din această lucrare nu poate fi reprodusă sub nicio formă, prin niciun mijloc mecanic sau electronic, sau stocată într-o bază de date fără acordul prealabil, în scris, al autorilor.

All rights reserved. Printed in Romania. No part of this publication may be reproduced or distributed in any form or by any means, or stored in a data base or retrieval system, without the prior written permission of the author.

ISBN 978-973-53-3603-5

**HIGH INTENSITY INTERVAL TRAINING
HIIT
MODULARE, INTEGRARE, PERFORMANȚĂ**

Autori:

**Dan Cristian Mănescu
Victor Dulceață
Cătălin Octavian Mănescu**

Director editură: GHEORGHE POP

Versiunea disponibilă online pdf reprezintă o variantă restrânsă (extras) și nu lucrarea în integralitatea sa.

COLECȚIA PALESTRA SCIENTIA

Cuprins

Capitolul 1 — HIIT și performanța aerobă / 5

1. Creșterea $VO_2\text{max}$: mecanisme reale / 7
2. Economie de efort și eficiență neuromusculară / 16
3. Toleranța la intensitate ridicată / 23
4. Transferul la sporturi de anduranță / 29
5. Limitele adaptării aerobe prin HIIT / 36

Capitolul 2 — HIIT și performanța anaerobă / 44

1. Capacitatea anaerobă vs. puterea anaerobă / 45
2. Adaptări neuromusculare / 51
3. Buffering-ul metabolic / 57
4. Repetabilitatea sprintului / 63
5. Specificitatea sportivă / 69

Capitolul 3 — Doză-răspuns în HIIT / 76

1. Volum minim eficient / 77
2. Intensitate vs. densitate / 82
3. Frecvență optimă / 88
4. Pragul de supraîncărcare / 93
5. Curba beneficiu-risc / 98

Capitolul 4 — Integrarea cu alte tipuri de antrenament / 104

1. HIIT + forță / 104
2. HIIT + volum aerobic / 110
3. HIIT + sprint / 115
4. Interferența adaptărilor / 120
5. Strategii de compatibilizare / 125

Capitolul 5 — Evaluarea și monitorizarea HIIT / 131

1. Indicatori fiziologici / 131
2. Markerii de oboseală / 137
3. HRV și limitele sale / 142
4. RPE și feedback subiectiv / 147
5. Erori comune de interpretare / 152

Sinteza / 157

Capitolul 1

HIIT și performanța aerobă

Performanța aerobă constituie expresia integrată a capacității organismului de a susține producția de energie prin procese oxidative în condiții de solicitare metabolică crescută. Aceasta nu reprezintă un atribut singular, reductibil la un indicator fiziologic izolat, ci rezultatul unei organizări funcționale multilaterale, în care sistemele cardiovascular, respirator, hematologic, muscular și neuroendocrin operează într-o interdependență dinamică. În acest context, înțelegerea performanței aerobe impune depășirea modelelor descriptive simplificate și adoptarea unei perspective sistemice, capabile să surprindă atât fluxurile de materie și energie, cât și mecanismele de reglare și adaptare care le susțin.

Definirea clasică a performanței aerobe în termeni de consum maxim de oxigen ($VO_2\max$) a oferit un cadru operațional robust pentru cercetarea fiziologică și pentru evaluarea comparativă a capacității de efort. Totuși, această definiție implică o reducere conceptuală care maschează heterogenitatea determinantelor implicate. $VO_2\max$ reprezintă un rezultat, nu un mecanism; o măsură agregată, nu o descriere a proceselor care o generează. Din acest motiv, interpretarea performanței aerobe exclusiv prin prisma acestui parametru conduce la o înțelegere incompletă a adaptărilor induse de antrenament, în special atunci când sunt implicate protocoale caracterizate prin intensități ridicate și structuri intermitente, precum HIIT.

Din punct de vedere fiziologic, performanța aerobă poate fi conceptualizată ca o succesiune de etape limitative, fiecare susceptibilă de a deveni factor determinant în funcție de nivelul de solicitare și de starea de antrenament a individului. Oxigenul trebuie captat la nivel pulmonar, difuzat în sânge, transportat prin intermediul hemoglobinei, distribuit prin debit cardiac adecvat, extras la nivel tisular și utilizat eficient în mitocondrii pentru sinteza de ATP. Orice constrângere la nivelul uneia dintre aceste etape poate limita fluxul global de energie disponibil pentru contracția musculară. În consecință, performanța aerobă nu este determinată de o singură verigă dominantă, ci de interacțiunea dintre multiple componente care pot deveni, în mod tranzitoriu sau cronic, factori limitativi.

Această perspectivă devine esențială în analiza efectelor antrenamentului de tip HIIT. Spre deosebire de antrenamentul continuu de intensitate moderată, care tinde să solicite predominant anumite componente ale sistemului aerobic într-un regim relativ stabil, HIIT introduce variații rapide și extreme ale cerințelor metabolice. Aceste variații generează un mediu fiziologic caracterizat prin alternanța între stări de dezechilibru acut și procese de restabilire, ceea ce conduce la activarea simultană a mai multor căi de adaptare. În loc să acționeze liniar asupra unei singure dimensiuni funcționale, HIIT produce perturbări sistemice care solicită organismul să dezvolte soluții integrative.

Un aspect fundamental al performanței aerobe îl reprezintă relația dintre livrarea și utilizarea oxigenului. Livrarea depinde în principal de funcția cardiovasculară și de capacitatea de transport a sângelui, în timp ce utilizarea este determinată de proprietățile metabolice ale țesutului muscular. În condiții de efort maxim, aceste două componente trebuie să fie sincronizate; o creștere a debitului cardiac fără o capacitate corespunzătoare de utilizare la nivel muscular conduce la o eficiență scăzută, iar o capacitate oxidativă ridicată în absența unei livrări adecvate de oxigen rămâne subutilizată. HIIT are particularitatea de a influența simultan ambele componente, generând adaptări atât la nivel central, cât și periferic.

La nivel cardiovascular, expunerea repetată la intensități apropiate de capacitatea maximă determină creșteri ale volumului sistolic și ale debitului cardiac, precum și modificări ale complianței ventriculare. Aceste adaptări sunt susținute de creșterea volumului plasmatic și de optimizarea reglării autonome a frecvenței cardiace. În paralel, la nivel periferic, se observă o creștere a densității capilare, o proliferare mitocondrială și o intensificare a activității enzimelor

implicate în metabolismul oxidativ. Aceste modificări facilitează extracția și utilizarea oxigenului, contribuind la creșterea eficienței energetice a contracției musculare.

Performanța aerobă nu poate fi separată de economia de efort, concept care reflectă cantitatea de energie necesară pentru realizarea unei sarcini mecanice date. Două persoane cu același $VO_2\max$ pot prezenta performanțe diferite în funcție de eficiența cu care transformă energia metabolică în lucru mecanic. Această eficiență este influențată de factori neuromusculari, biomecanici și metabolici, inclusiv recrutarea unităților motorii, coordonarea intermusculară și utilizarea substraturilor energetice. HIIT contribuie la optimizarea acestor procese prin expunerea repetată la condiții de solicitare intensă, care necesită o integrare rapidă și eficientă a răspunsurilor neuromusculare și metabolice.

Un alt element esențial în înțelegerea performanței aerobe îl reprezintă pragurile fiziologice, în special pragul lactat și pragul ventilator. Acestea reflectă punctele de tranziție în care contribuția metabolismului anaerob crește semnificativ, iar homeostazia metabolică devine mai dificil de menținut. Capacitatea de a susține efortul la intensități apropiate de aceste praguri este un determinant major al performanței în probele de duranță. HIIT influențează aceste praguri prin adaptări care includ îmbunătățirea capacității de tamponare a ionilor de hidrogen, creșterea eficienței transportului lactatului și optimizarea utilizării acestuia ca substrat energetic.

În analiza performanței aerobe, trebuie luată în considerare și dimensiunea temporală a adaptărilor. Răspunsurile acute la efort sunt urmate de procese de recuperare și remodelare, care conduc la modificări structurale și funcționale pe termen lung. HIIT, prin natura sa intermitentă și intensă, generează stimuli care depășesc pragurile necesare pentru activarea mecanismelor de adaptare, dar în același timp impune o gestionare atentă a echilibrului dintre stres și recuperare. Supraîncărcarea excesivă poate conduce la disfuncții autonome, la acumularea de oboseală cronică și la scăderea performanței, subliniind necesitatea unei dozări precise a antrenamentului.

Din perspectivă moleculară, adaptările aerobe sunt mediate de o rețea complexă de semnale intracelulare, care includ activarea unor factori de transcripție și coactivatori implicați în biogeneza mitocondrială și în reglarea metabolismului energetic. Printre aceștia, un rol central îl au proteinele kinazice sensibile la starea energetică a celulei și căile de semnalizare asociate cu stresul metabolic. HIIT, prin inducerea unor fluctuații rapide ale raportului dintre adenzin trifosfat și adenzin monofosfat, precum și ale nivelurilor de calciu intracelular și de specii reactive de oxigen, activează aceste căi într-un mod distinct față de antrenamentul continuu. Rezultatul este o amplificare a semnalelor care conduc la adaptări structurale și funcționale.

Performanța aerobă este influențată și de factori genetici, care determină variabilitatea interindividuală a răspunsului la antrenament. Există diferențe semnificative în capacitatea de a crește $VO_2\max$, în adaptările mitocondriale și în răspunsurile cardiovasculare, ceea ce sugerează existența unor limite biologice individuale. Cu toate acestea, mediul de antrenament și structura stimulilor pot modula expresia acestor predispoziții genetice. HIIT, prin diversitatea și intensitatea sa, oferă un cadru în care pot fi explorate aceste limite și pot fi optimizate răspunsurile adaptative.

Un aspect adesea neglijat în analiza performanței aerobe este rolul sistemului nervos central în reglarea efortului. Performanța nu este determinată exclusiv de capacitatea periferică de producere a energiei, ci și de mecanismele centrale care modulează recrutarea musculară și percepția efortului. HIIT implică expunerea repetată la senzații de disconfort intens, ceea ce poate conduce la adaptări la nivelul toleranței centrale și al strategiilor de control al efortului. Aceste adaptări pot influența performanța în mod indirect, prin modificarea modului în care individul gestionează resursele energetice disponibile.

În contextul sporturilor de anduranță, performanța aerobă este determinată nu doar de capacitatea maximă, ci și de abilitatea de a menține o fracțiune ridicată din aceasta pe durate prelungite. Această abilitate depinde de eficiența metabolică, de rezistența la oboseală și de capacitatea de a menține homeostazia în condiții de stres prelungit. HIIT contribuie la dezvoltarea acestor capacități prin expunerea la intensități ridicate care solicită sistemele de reglare într-un mod accentuat, favorizând adaptări care pot fi transferate la eforturi de durată.

Analiza performanței aerobe în contextul HIIT trebuie să țină cont și de limitele acestei metode. Deși HIIT este eficient în inducerea unor adaptări rapide, acesta nu poate substitui complet antrenamentul de volum în dezvoltarea capacităților necesare pentru eforturi de lungă durată. Există adaptări specifice, cum ar fi creșterea capacității de oxidare a lipidelor și dezvoltarea rețelei capilare la scară largă, care sunt favorizate de expuneri prelungite la intensități moderate. Prin urmare, integrarea HIIT într-un program de antrenament trebuie realizată în mod strategic, ținând cont de obiectivele specifice și de caracteristicile individului.

În concluzie, performanța aerobă reprezintă un construct complex, care nu poate fi redus la un singur indicator sau la un set limitat de mecanisme. HIIT oferă un model de stimulare care perturbă simultan multiple componente ale sistemului, generând adaptări integrate care pot conduce la îmbunătățiri semnificative ale capacității de efort. Înțelegerea acestor procese necesită o abordare interdisciplinară, care să integreze perspectivele fiziologice, biochimice și neurobiologice, precum și o analiză critică a limitelor și potențialului acestei metode de antrenament.

1.1. Creșterea $VO_2\text{max}$: mecanisme reale

Creșterea $VO_2\text{max}$ reprezintă una dintre cele mai investigate și, în același timp, cele mai simplificate adaptări asociate antrenamentului de tip HIIT. Deși literatura a tratat frecvent acest indicator ca pe un rezultat direct al stimulului de intensitate ridicată, o astfel de abordare riscă să confunde efectul cu mecanismul. $VO_2\text{max}$ nu este o entitate independentă, ci expresia integrată a unei serii de procese fiziologice interdependente, a căror contribuție relativă variază în funcție de nivelul de antrenament, de tipul de stimul și de contextul biologic al individului.

În esență, $VO_2\text{max}$ reflectă limita superioară a fluxului de oxigen de la mediul extern către mitocondrie și capacitatea acesteia de a utiliza oxigenul pentru producția de ATP. Această limită nu este fixă, ci emergentă, rezultând din interacțiunea dintre componente centrale și periferice, dintre constrângeri structurale și reglaje funcționale, dintre disponibilitate și utilizare. HIIT se distinge prin faptul că generează condiții în care aceste componente sunt simultan solicitate la niveluri apropiate de capacitatea lor maximă, ceea ce conduce la o reorganizare a relațiilor dintre ele.

Un aspect critic în înțelegerea mecanismelor reale de creștere a $VO_2\text{max}$ este dinamica limitării fiziologice. În stadiile inițiale de antrenament, limitarea este predominant centrală, fiind determinată de capacitatea sistemului cardiovascular de a livra oxigen. Pe măsură ce acest sistem se adaptează, limitarea se deplasează progresiv către periferie, unde eficiența extracției și utilizării oxigenului devine determinantă. HIIT accelerează această tranziție prin expunerea repetată la solicitări care depășesc pragurile obișnuite de activare ale ambelor componente.

Mai mult, creșterea $VO_2\text{max}$ nu este rezultatul unei simple „amplificări” a unei verigi existente, ci al unei recalibrări a întregului sistem. Adaptările cardiovasculare, hematologice și musculare nu evoluează independent, ci sunt coordonate prin mecanisme de reglare care includ feedback-uri metabolice, semnale mecanice și răspunsuri neuroendocrine. HIIT creează un mediu în care aceste mecanisme sunt activate într-un mod sinergic, favorizând apariția unor adaptări care nu pot fi explicate prin modele liniare.

Un alt element esențial îl reprezintă diferența dintre capacitatea teoretică și utilizarea efectivă a acesteia. $VO_2\text{max}$ măsoară o limită, dar performanța depinde de cât de eficient poate fi utilizată această limită în condiții reale de efort. HIIT influențează nu doar nivelul maxim, ci

și cinetica atingerii acestuia, precum și stabilitatea funcționării în apropierea acestui nivel. Astfel, creșterea $VO_2\max$ trebuie interpretată în contextul unei îmbunătățiri globale a funcționării sistemului oxidativ.

În același timp, trebuie recunoscut faptul că răspunsul $VO_2\max$ la HIIT este caracterizat de o variabilitate interindividuală semnificativă. Există indivizi care prezintă creșteri substanțiale și alții la care adaptările sunt limitate, în ciuda expunerii la stimuli similari. Această variabilitate reflectă interacțiunea dintre factori genetici, istoricul de antrenament și particularitățile structurale și funcționale ale organismului. În consecință, analiza mecanismelor trebuie să depășească nivelul descriptiv și să integreze această diversitate în interpretarea rezultatelor.

Înțelegerea creșterii $VO_2\max$ în contextul HIIT impune, așadar, o abordare care să depășească paradigma tradițională a „factorului limitativ unic” și să adopte o perspectivă de tip rețea, în care performanța rezultă din interacțiunea dinamică a mai multor componente. HIIT nu acționează asupra unui singur nod al acestei rețele, ci modifică simultan mai multe relații funcționale, ceea ce explică eficiența sa aparent disproporționată în raport cu volumul de antrenament.

Determinantele centrale ale $VO_2\max$: rolul debitului cardiac și al volumului sistolic

- determinantele centrale ale $VO_2\max$ sunt, în esență, expresia capacității sistemului cardiovascular de a livra oxigen către musculatura activă într-un ritm suficient pentru a susține cerințele metabolice ale efortului maximal. În cadrul acestui sistem, două variabile ocupă o poziție dominantă: debitul cardiac (\dot{Q}) și volumul sistolic (SV). Relația dintre acestea este fundamentală, întrucât debitul cardiac este produsul dintre frecvența cardiacă și volumul sistolic, iar în condiții de efort maximal, creșterea suplimentară a \dot{Q} este determinată aproape exclusiv de modificările volumului sistolic, frecvența cardiacă atingând rapid valori apropiate de plafonul individual.

Înțelegerea rolului volumului sistolic în determinarea $VO_2\max$ necesită o analiză a mecanismelor care guvernează umplerea și ejecția ventriculară. Volumul sistolic este dependent de trei factori principali: preload-ul (volumul de sânge care umple ventriculul înainte de contracție), afterload-ul (rezistența împotriva căreia ventriculul trebuie să pompeze sângele) și contractilitatea miocardică. În condiții de efort intens, HIIT produce modificări acute și cronice asupra acestor determinante, generând un mediu favorabil creșterii volumului sistolic.

Preload-ul este influențat în mod direct de întoarcerea venoasă, care, la rândul său, depinde de volumul plasmatic, de activitatea pompei musculare și de tonusul venos. HIIT, prin alternanța dintre contracții musculare intense și perioade de recuperare, amplifică mecanismele care facilitează întoarcerea venoasă, conducând la o creștere a volumului telediastolic. În timp, această solicitare repetată determină adaptări structurale la nivel cardiac, inclusiv dilatarea cavității ventriculare stângi și creșterea complianței acesteia. Aceste modificări permit ventriculului să se umple mai eficient la presiuni mai scăzute, optimizând relația dintre volum și presiune și contribuind la creșterea volumului sistolic.

Contractilitatea miocardică este influențată de activarea sistemului nervos simpatic și de disponibilitatea ionilor de calciu la nivelul fibrelor musculare cardiace. În timpul intervalelor de intensitate ridicată, HIIT induce o activare simpatică pronunțată, crescând forța de contracție a miocardului și, implicit, fracția de ejecție. Repetarea acestui tip de stimul conduce la adaptări funcționale care includ îmbunătățirea sensibilității la catecolamine și optimizarea mecanismelor de manipulare a calciului intracelular. Aceste adaptări permit menținerea unui nivel ridicat de contractilitate chiar și în condiții de oboseală acumulată.

Afterload-ul, reprezentat în principal de rezistența vasculară periferică, joacă un rol critic în determinarea eficienței ejecției ventriculare. HIIT influențează această componentă prin adaptări la nivelul endoteliului vascular, inclusiv creșterea producției de oxid nitric și

îmbunătățirea funcției vasodilatatoare. Aceste modificări reduc rezistența periferică în timpul efortului, facilitând ejecția sângelui și contribuind indirect la creșterea volumului sistolic.

Dincolo de aceste mecanisme individuale, este esențial de subliniat faptul că adaptările centrale nu sunt independente de cele periferice. Creșterea debitului cardiac are valoare funcțională doar în măsura în care sângele este distribuit eficient către musculatura activă și oxigenul este utilizat la nivel tisular. HIIT favorizează această integrare prin solicitarea simultană a sistemelor centrale și periferice, ceea ce conduce la o optimizare a relației dintre livrare și utilizare.

Un element distinctiv al HIIT în raport cu antrenamentul continuu este amplitudinea fluctuațiilor hemodinamice induse. În timpul intervalelor de intensitate ridicată, debitul cardiac se apropie de valorile maxime, iar presiunile intracardiace cresc semnificativ. În perioadele de recuperare, aceste variabile scad, dar rămân peste nivelurile de repaus. Această alternanță creează un stimul mecanic pulsatoriu asupra structurilor cardiovasculare, care este considerat un factor important în inițierea și susținerea adaptărilor structurale. Spre deosebire de solicitarea relativ constantă din antrenamentul continuu, HIIT introduce variații care pot amplifica semnalele de remodelare.

În ceea ce privește debitul cardiac maximal, creșterea acestuia este limitată în principal de capacitatea de creștere a volumului sistolic, întrucât frecvența cardiacă maximală este în mare parte determinată genetic și influențată într-o măsură redusă de antrenament. Prin urmare, îmbunătățirile VO_2max observate în urma HIIT sunt, în mare măsură, mediate de creșterea volumului sistolic și, implicit, a debitului cardiac maximal. Această relație este susținută de numeroase observații experimentale care indică o corelație puternică între volumul sistolic maximal și VO_2max .

Adaptările centrale sunt influențate și de modificările volumului sanguin total și ale concentrației de hemoglobină. HIIT poate determina creșteri ale volumului plasmatic, ceea ce contribuie la îmbunătățirea întoarcerii venoase și la stabilizarea presiunii arteriale în timpul efortului. În același timp, modificările masei eritrocitare pot influența capacitatea de transport a oxigenului, deși aceste adaptări sunt mai lente și dependente de factori suplimentari, precum statusul nutrițional și expunerea la hipoxie.

Este important de remarcat faptul că adaptările centrale prezintă o dinamică diferită în funcție de nivelul de antrenament al individului. La subiecții neantrenați, creșterile VO_2max sunt în mare parte atribuite îmbunătățirilor debitului cardiac, în timp ce la sportivii antrenați, unde aceste mecanisme sunt deja optimizate, contribuția relativă a adaptărilor centrale este mai redusă. În aceste condiții, creșterile suplimentare ale VO_2max depind într-o măsură mai mare de adaptările periferice. Cu toate acestea, HIIT poate continua să stimuleze componentele centrale chiar și la niveluri ridicate de antrenament, datorită intensității sale care depășește frecvent pragurile atinse în antrenamentele tradiționale.

Un alt aspect relevant îl reprezintă eficiența energetică a sistemului cardiovascular. Creșterea debitului cardiac implică un cost energetic pentru miocard, iar adaptările induse de antrenament trebuie să optimizeze raportul dintre cost și beneficiu. HIIT poate contribui la această optimizare prin îmbunătățirea eficienței mecanice a contracției cardiace și prin reducerea consumului de oxigen al miocardului pentru o anumită sarcină hemodinamică. Aceste adaptări sunt esențiale pentru menținerea performanței în condiții de solicitare repetată.

Determinantele centrale ale VO_2max trebuie înțelese ca un sistem integrat, în care volumul sistolic, debitul cardiac, funcția vasculară și proprietățile hematologice interacționează pentru a susține livrarea oxigenului. HIIT acționează asupra acestui sistem prin generarea unor stimuli de intensitate ridicată și variabilitate hemodinamică, care conduc la adaptări structurale și funcționale. Creșterea VO_2max rezultată nu este produsul unei modificări izolate, ci expresia unei reorganizări a sistemului cardiovascular în ansamblul său, în direcția unei capacități sporite de a susține fluxuri energetice ridicate.

Determinantele periferice: extracția oxigenului și adaptările musculare oxidative - dacă determinantele centrale stabilesc limita superioară a livrării oxigenului, determinantele periferice definesc capacitatea efectivă a sistemului de a transforma acest flux într-un proces metabolic util. În acest sens, extracția oxigenului la nivel tisular și utilizarea sa mitocondrială reprezintă verigi critice ale performanței aerobe, iar contribuția lor devine din ce în ce mai dominantă pe măsură ce nivelul de antrenament crește. VO_{2max} nu este doar o problemă de cât oxigen ajunge la mușchi, ci de cât din acest oxigen poate fi captat și integrat în procesele oxidative. Această distincție este esențială, întrucât definește tranziția de la limitarea centrală la cea periferică.

Extracția oxigenului este exprimată prin diferența arterio-venoasă de oxigen ($a-vO_2$ diff), care reflectă proporția de oxigen extras din sânge la nivelul țesuturilor active. Creșterea acestei diferențe este rezultatul unei combinații de factori structurali și funcționali, incluzând densitatea capilară, proprietățile de difuzie tisulară și capacitatea oxidativă a fibrelor musculare. HIIT influențează toate aceste componente printr-un mecanism fundamental: inducerea repetată a unor stări de dezechilibru metabolic sever, care obligă sistemul periferic să își crească eficiența de utilizare a resurselor disponibile.

La nivel structural, una dintre cele mai importante adaptări este creșterea densității capilare. O rețea capilară mai densă reduce distanța de difuzie a oxigenului între sânge și mitocondrie, crescând eficiența transferului. În același timp, crește suprafața totală disponibilă pentru schimburile gazoase, ceea ce permite o distribuție mai uniformă a fluxului sanguin la nivelul fibrelor musculare. HIIT stimulează angiogeneza prin mecanisme dependente de hipoxie locală și de stres mecanic, incluzând activarea factorilor de creștere endotelială și a căilor de semnalizare asociate. Alternanța între perioade de ischemie relativă și reperfuzie generează un mediu propice pentru remodelarea vasculară.

La nivelul fibrelor musculare, adaptările oxidative sunt mediate în principal de modificări ale conținutului și funcției mitocondriale. Mitocondriile reprezintă locul final al utilizării oxigenului, iar densitatea și eficiența acestora determină capacitatea de producere a ATP prin fosforilare oxidativă. HIIT induce o creștere semnificativă a biogenezei mitocondriale, prin activarea unor căi de semnalizare sensibile la stresul energetic celular. Fluctuațiile rapide ale raportului ATP/ADP și acumularea de metaboliți intermediari acționează ca semnale pentru inițierea proceselor de adaptare. Rezultatul este o creștere atât a numărului de mitocondrii, cât și a eficienței acestora în utilizarea substraturilor energetice.

Activitatea enzimelor oxidative constituie o altă componentă esențială a determinantilor periferici. Enzimele implicate în ciclul Krebs, lanțul de transport al electronilor și β -oxidarea acizilor grași sunt upreglate în urma antrenamentului de tip HIIT, ceea ce conduce la o creștere a capacității de oxidare a substraturilor. Această adaptare nu doar că permite o producție mai mare de ATP, dar contribuie și la reducerea acumulării de metaboliți asociați cu oboseala, precum lactatul și ionii de hidrogen. În acest sens, extracția eficientă a oxigenului este strâns legată de capacitatea de a menține echilibrul metabolic în condiții de solicitare intensă.

Un element distinctiv al adaptărilor periferice induse de HIIT este caracterul lor rapid și pronunțat. În comparație cu antrenamentul continuu, care produce adaptări progresive și relativ uniforme, HIIT generează răspunsuri acute intense, care accelerează procesele de remodelare. Această accelerare este determinată de amplitudinea stresului metabolic, care depășește pragurile necesare pentru activarea mecanismelor de adaptare. Cu toate acestea, această eficiență aparentă trebuie interpretată în contextul unei solicitări crescute, care implică și riscuri asociate cu supraîncărcarea.

Din punct de vedere funcțional, adaptările periferice se traduc printr-o capacitate crescută de a extrage și utiliza oxigenul la nivelul fibrelor musculare active. Aceasta permite menținerea unui nivel ridicat de producție energetică chiar și în condiții în care livrarea de oxigen este limitată. În același timp, îmbunătățirea eficienței oxidative contribuie la reducerea costului

energetic al efortului, ceea ce are implicații directe asupra performanței. Cu alte cuvinte, nu doar că mușchiul devine capabil să consume mai mult oxigen, dar o face într-un mod mai eficient.

Trebuie subliniat faptul că adaptările periferice nu sunt uniforme la nivelul tuturor tipurilor de fibre musculare. Fibrele de tip I, caracterizate printr-o capacitate oxidativă ridicată, prezintă deja un nivel avansat de adaptare, în timp ce fibrele de tip II, în special cele de tip IIa, pot suferi transformări semnificative în urma antrenamentului. HIIT are capacitatea de a recruta aceste fibre în mod repetat, stimulând adaptări care le cresc potențialul oxidativ. Această plasticitate contribuie la extinderea capacității globale a mușchiului de a susține efortul aerobic.

Interacțiunea dintre perfuzie și metabolism reprezintă un alt aspect critic al determinantilor periferici. Distribuția fluxului sanguin la nivel muscular nu este uniformă, ci reglată în funcție de activitatea metabolică locală. HIIT influențează această distribuție prin mecanisme care includ vasodilatația locală mediată de metaboliți și ajustări ale tonusului vascular. Rezultatul este o alocare mai eficientă a resurselor, care optimizează raportul dintre livrare și utilizare.

De asemenea, trebuie luată în considerare contribuția sistemelor de transport intracelular al oxigenului și substraturilor. Proteine precum mioglobina facilitează difuzia oxigenului în interiorul fibrelor musculare, iar adaptările la nivelul acestora pot influența eficiența globală a utilizării oxigenului. Deși rolul lor este mai puțin discutat în literatura generală, aceste componente contribuie la finețea reglajului metabolic și la capacitatea de a susține eforturi de intensitate ridicată.

Determinantele periferice ale $VO_2\text{max}$ reprezintă un sistem complex, în care structura vasculară, proprietățile musculare și mecanismele metabolice interacționează pentru a maximiza utilizarea oxigenului disponibil. HIIT acționează asupra acestui sistem prin generarea unor condiții de stres metabolic intens și variabil, care stimulează adaptări rapide și profunde. Creșterea $VO_2\text{max}$ rezultată din aceste adaptări nu poate fi atribuită exclusiv îmbunătățirii livrării de oxigen, ci reflectă o capacitate crescută a mușchiului de a transforma oxigenul în energie utilă, într-un mod eficient și sustenabil.

Interacțiunea livrare–utilizare: sincronizarea sistemului aerobic - performanța aerobă nu este determinată exclusiv de capacitatea de livrare a oxigenului sau de eficiența utilizării acestuia la nivel muscular, ci de relația funcțională dintre aceste două componente. Această relație, adesea conceptualizată ca un cuplaj între sistemele centrale și periferice, definește nivelul real de funcționare al metabolismului oxidativ. $VO_2\text{max}$ emerge din această interacțiune, nu ca o sumă aritmetică a contribuțiilor individuale, ci ca rezultatul unei sincronizări dinamice între fluxul de oxigen și cerințele metabolice ale țesuturilor active.

În absența unei sincronizări eficiente, creșterea uneia dintre componente nu se traduce automat în îmbunătățirea performanței. Un debit cardiac crescut, în lipsa unei capacități adecvate de extracție și utilizare a oxigenului, conduce la un flux sanguin subutilizat. În mod similar, o capacitate oxidativă musculară ridicată, în absența unei livrări suficiente de oxigen, rămâne latentă. Din acest motiv, performanța aerobă trebuie analizată în termeni de integrare funcțională, nu de dezvoltare izolată a componentelor.

Conceptul de sincronizare implică atât aspecte cantitative, cât și temporale. Din punct de vedere cantitativ, este necesară o corelare între debitul cardiac și capacitatea de extracție tisulară, astfel încât oxigenul livrat să fie utilizat în proporție maximă. Din punct de vedere temporal, această corelare trebuie să fie rapidă și stabilă, pentru a permite adaptarea la variațiile rapide ale cerințelor energetice. HIIT se remarcă prin capacitatea de a antrena simultan aceste două dimensiuni, datorită naturii sale intermitente și intensității ridicate a efortului.

În timpul intervalelor de intensitate maximă, cerințele metabolice cresc abrupt, solicitând o creștere rapidă a debitului cardiac și o activare intensă a mecanismelor periferice de extracție a oxigenului. Această creștere trebuie să fie sincronizată pentru a evita apariția unor dezechilibre funcționale, cum ar fi hipoperfuzia relativă sau acumularea excesivă de metaboliți.

În perioadele de recuperare, sistemul trebuie să restabilească echilibrul, fără a reveni complet la starea de repaus, menținând astfel un nivel ridicat de activare. Această alternanță creează un mediu în care mecanismele de reglare sunt antrenate în mod repetat, ceea ce conduce la o îmbunătățire a capacității de sincronizare.

Un aspect central al acestei sincronizări îl reprezintă distribuția fluxului sanguin la nivel muscular. În condiții de efort, fluxul nu este distribuit uniform, ci direcționat preferențial către fibrele active. Această redistribuire este mediată de o combinație de factori locali și centrali, incluzând metaboliți, semnale endoteliale și control autonom. HIIT influențează aceste mecanisme prin solicitarea repetată a sistemului de reglare, ceea ce conduce la o alocare mai eficientă a resurselor. Rezultatul este o reducere a „pierderilor” de flux și o creștere a proporției de oxigen utilizat efectiv.

Sincronizarea livrare–utilizare este dependentă și de proprietățile hemodinamice ale sistemului vascular. Elasticitatea arterială, rezistența periferică și capacitatea de vasodilatație influențează modul în care fluxul sanguin este transmis către țesuturi. HIIT determină adaptări la nivelul acestor proprietăți, îmbunătățind transmiterea pulsului de presiune și facilitând ajustările rapide ale fluxului. Aceste modificări contribuie la stabilizarea relației dintre livrare și utilizare în condiții de solicitare variabilă.

La nivel muscular, sincronizarea este influențată de organizarea structurală și funcțională a fibrelor. Proximitatea capilarelor față de mitocondrii, distribuția enzimelor oxidative și capacitatea de transport intracelular al oxigenului sunt factori care determină eficiența utilizării. HIIT optimizează aceste caracteristici prin adaptări care reduc distanțele de difuzie și cresc capacitatea de procesare metabolică. În acest fel, oxigenul livrat este integrat mai rapid și mai eficient în procesele de producere a energiei.

Un alt element esențial al sincronizării îl reprezintă coordonarea dintre sistemul cardiovascular și cel respirator. Ventilația trebuie să fie ajustată în mod corespunzător pentru a asigura o oxigenare adecvată a sângelui, iar această ajustare trebuie să fie sincronizată cu cerințele circulatorii. HIIT influențează această coordonare prin expunerea repetată la solicitări ventilatorii intense, ceea ce conduce la adaptări ale controlului respirator și la o îmbunătățire a eficienței schimburilor gazoase.

Din perspectivă metabolică, sincronizarea livrare–utilizare este reflectată în capacitatea de a menține homeostazia energetică în condiții de stres. Acest lucru implică nu doar furnizarea de oxigen, ci și eliminarea eficientă a produselor metabolice și menținerea echilibrului acidobazic. HIIT contribuie la optimizarea acestor procese prin stimularea mecanismelor de tamponare și de transport al metaboliților, ceea ce permite funcționarea eficientă a sistemului în condiții de solicitare ridicată.

Un aspect adesea neglijat este rolul sistemului nervos în coordonarea acestor procese. Reglarea debitului cardiac, a distribuției fluxului sanguin și a ventilației este mediată de mecanisme centrale și periferice care integrează informații provenite din multiple surse. HIIT, prin natura sa solicitantă, antrenează aceste mecanisme de reglare, conducând la o îmbunătățire a capacității de integrare și răspuns. Această adaptare contribuie la o sincronizare mai fină și mai rapidă a sistemului.

În condiții optime, sincronizarea livrare–utilizare conduce la o eficiență maximă a sistemului aerob, în care fiecare unitate de oxigen livrat este utilizată pentru producția de energie. În condiții suboptime, apar dezechilibre care se manifestă prin scăderea performanței și creșterea costului energetic. HIIT reduce aceste dezechilibre prin antrenarea simultană a tuturor componentelor implicate, favorizând o integrare funcțională superioară.

Interacțiunea dintre livrarea și utilizarea oxigenului reprezintă nucleul performanței aerobe. HIIT acționează asupra acestui nucleu nu prin dezvoltarea izolată a componentelor, ci prin îmbunătățirea relației dintre ele. Creșterea VO_{2max} și a performanței nu este rezultatul

unei singure adaptări, ci al unei sincronizări mai eficiente a întregului sistem, care permite organismului să opereze la un nivel superior de integrare funcțională.

Cinetica VO₂ și timpul până la VO₂max: importanța răspunsului dinamic - analiza tradițională a VO₂max s-a concentrat predominant asupra valorii maxime atinse în condiții de efort incremental, tratând performanța aerobă ca pe o limită statică. Această abordare omite însă o dimensiune esențială a funcționării sistemului oxidativ: dinamica răspunsului. Capacitatea de a atinge rapid niveluri ridicate de consum de oxigen și de a stabiliza acest răspuns în condiții de solicitare variabilă reprezintă un determinant major al performanței, în special în contexte caracterizate prin schimbări frecvente de intensitate, așa cum se întâmplă în majoritatea sporturilor reale.

Cinetica VO₂ descrie viteza cu care consumul de oxigen crește de la nivelul de repaus sau de efort submaximal la un nou nivel impus de intensitatea exercițiului. Acest proces nu este instantaneu, ci implică o întârziere determinată de inerția sistemelor fiziologice implicate în livrarea și utilizarea oxigenului. Această întârziere are consecințe directe asupra metabolismului energetic, întrucât, în fazele inițiale ale efortului, deficitul de oxigen este compensat prin creșterea contribuției anaerobe, ceea ce conduce la acumularea de metaboliți și la instalarea mai rapidă a obosealii.

Reducerea acestui deficit și accelerarea cineticii VO₂ constituie, prin urmare, un obiectiv esențial al adaptărilor induse de antrenament. HIIT se dovedește deosebit de eficient în acest sens, datorită naturii sale care implică tranziții repetate între stări metabolice distincte. Fiecare interval de intensitate ridicată inițiază un nou răspuns al consumului de oxigen, iar repetarea acestor tranziții antrenează sistemul să reducă timpul necesar pentru atingerea unui nou echilibru funcțional.

Din punct de vedere fiziologic, cinetica VO₂ este determinată de interacțiunea dintre componentele centrale și periferice. La nivel central, viteza de creștere a debitului cardiac influențează rata de livrare a oxigenului, în timp ce la nivel periferic, activarea rapidă a metabolismului oxidativ determină capacitatea de utilizare. Întârzierea în oricare dintre aceste componente contribuie la prelungirea fazei de ajustare și la creșterea dependenței de metabolismul anaerob. HIIT îmbunătățește ambele componente prin adaptări care includ o activare mai rapidă a răspunsului cardiovascular și o creștere a sensibilității mecanismelor metabolice.

Un element important al cineticii VO₂ îl reprezintă fazele sale distincte. În primele secunde ale efortului, creșterea consumului de oxigen este limitată de inerția sistemelor de transport și de activare enzimatică. Ulterior, sistemul intră într-o fază de ajustare rapidă, în care consumul de oxigen crește exponențial către un nivel apropiat de echilibru. În condiții de intensitate ridicată, acest echilibru poate să nu fie atins înainte de epuizare, iar VO₂ continuă să crească progresiv până la atingerea valorii maxime. HIIT influențează aceste faze prin reducerea constantei de timp a răspunsului, ceea ce permite atingerea mai rapidă a unor niveluri ridicate de consum de oxigen.

Importanța timpului până la VO₂max devine evidentă în contexte în care durata efortului este limitată sau în care intensitatea variază frecvent. În astfel de situații, capacitatea de a atinge rapid un nivel ridicat de consum de oxigen poate face diferența între menținerea unui echilibru metabolic și acumularea accelerată de oboseală. HIIT, prin expunerea repetată la intervale scurte și intense, antrenează sistemul să reducă această latență, ceea ce conduce la o utilizare mai eficientă a metabolismului oxidativ încă din fazele inițiale ale efortului.

Adaptările care stau la baza îmbunătățirii cineticii VO₂ sunt multiple și interdependente. La nivel muscular, creșterea densității mitocondriale și a activității enzimelor oxidative permite o activare mai rapidă a metabolismului aerob. În paralel, îmbunătățirea perfuziei și a distribuției fluxului sanguin facilitează livrarea rapidă a oxigenului către fibrele active. La nivel cardiovascular, creșterea capacității de ajustare a debitului cardiac contribuie la reducerea

întârzierii în livrare. Aceste adaptări converg către un răspuns mai rapid și mai eficient al sistemului.

Un alt aspect relevant îl reprezintă relația dintre cinetica VO_2 și toleranța la efort. Un răspuns lent al consumului de oxigen este asociat cu o dependență mai mare de metabolismul anaerob, ceea ce conduce la acumularea de lactat și la scăderea pH-ului muscular. Aceste modificări afectează funcția contractilă și contribuie la instalarea oboselii. Prin accelerarea cineticii VO_2 , HIIT reduce aceste efecte, permițând menținerea unui nivel mai ridicat de performanță pentru o durată mai mare.

În plus, cinetica VO_2 influențează și eficiența energetică globală a organismului. Un sistem capabil să atingă rapid echilibrul oxidativ minimizează costurile asociate cu tranzițiile metabolice și reduce pierderile energetice. Această eficiență este deosebit de importantă în sporturile caracterizate prin variații frecvente de intensitate, unde fiecare tranziție implică un cost metabolic. HIIT optimizează aceste tranziții, contribuind la o utilizare mai economică a resurselor energetice.

Trebuie subliniat faptul că îmbunătățirea cineticii VO_2 nu este nelimitată. Există constrângeri fiziologice legate de viteza de activare a sistemelor implicate și de proprietățile structurale ale acestora. Cu toate acestea, HIIT permite apropierea de aceste limite prin stimularea repetată a sistemului în condiții de solicitare maximă. În același timp, variabilitatea interindividuală joacă un rol important, iar răspunsul la antrenament poate diferi semnificativ între indivizi.

Cinetica VO_2 și timpul până la atingerea valorilor maxime reprezintă dimensiuni esențiale ale performanței aerobe, care completează perspectiva statică oferită de VO_{2max} . HIIT influențează aceste dimensiuni prin antrenarea răspunsului dinamic al sistemului, conducând la o reducere a întârzierilor și la o îmbunătățire a eficienței funcționale. Performanța rezultată nu este doar mai mare în termeni absoluți, ci și mai adaptabilă la cerințele variabile ale efortului real.

Variabilitatea răspunsului și limitele adaptării VO_{2max} - creșterea VO_{2max} în urma antrenamentului de tip HIIT este adesea prezentată ca un efect robust și relativ predictibil, însă o analiză atentă a literaturii evidențiază o variabilitate interindividuală semnificativă. Există indivizi care răspund cu creșteri substanțiale ale VO_{2max} și alții la care modificările sunt minime sau chiar absente, în ciuda expunerii la protocoale similare. Această variabilitate nu reprezintă o anomalie, ci reflectă complexitatea determinantelor biologice și a interacțiunilor dintre acestea. Înțelegerea limitelor adaptării VO_{2max} implică, prin urmare, o abordare care să integreze factori genetici, structurali, funcționali și contextuali.

Un prim nivel al variabilității este determinat genetic. Există diferențe ereditare în ceea ce privește dimensiunile și funcționalitatea sistemului cardiovascular, capacitatea oxidativă musculară și sensibilitatea la stimuli de antrenament. Aceste diferențe influențează atât nivelul inițial al VO_{2max} , cât și potențialul de creștere. Studiile asupra familiilor și gemenilor au evidențiat faptul că o proporție semnificativă a variabilității răspunsului la antrenament poate fi atribuită factorilor genetici. Cu toate acestea, expresia acestor predispoziții este modulată de mediul de antrenament, ceea ce sugerează că limitele nu sunt absolut fixe, ci condiționate.

Nivelul de antrenament anterior reprezintă un alt determinant major al răspunsului VO_{2max} . La indivizii neantrenați, adaptările sunt rapide și pronunțate, fiind dominate de îmbunătățiri ale funcției cardiovasculare și ale volumului plasmatic. Pe măsură ce nivelul de antrenament crește, rata de progres încetinește, iar contribuția adaptărilor periferice devine mai importantă. La sportivii de elită, unde sistemele centrale sunt deja optimizate, creșterile suplimentare ale VO_{2max} sunt limitate și necesită stimuli extrem de specifici și bine dozați. În acest context, HIIT poate continua să inducă adaptări, dar amplitudinea acestora este redusă, iar variabilitatea răspunsului crește.