FAN VA TA’LIM YANGILIKLARI
ILMIY-METODIK JURNAL
ISSN 3093-8694 ◆ saen.uz
2026-yil
11(1)-son

UDK: 612.1:577.1

Xayrullayeva Maftuna Ibodullayevna,
Alfraganus universiteti “Tibbiyot” kafedrasi assistenti

Maxmudov Abdulloh Salohiddin o‘g‘li,
Alfraganus universiteti davolash ishi yo‘nalishi 4-kurs talabasi

2,3-BPG VA GEMOGLOBIN–KISLOROD DISSOTSIATSIYA EGRI CHIZIG‘I: FIZIOLOGIK VA KLINIK AHAMIYATI

Annotatsiya. Kislorodning o‘pkadan periferik to‘qimalarga yetkazib berilishi hujayralarning aerob metabolizmi va normal hayot faoliyatini ta’minlovchi muhim fiziologik jarayon hisoblanadi. Ushbu jarayonda gemoglobin asosiy transport oqsili sifatida ishtirok etib, o‘pkada kislorodni biriktiradi va periferik to‘qimalarda uni ajratib beradi. Gemoglobinning kislorodga affiniteti hamda kislorodni to‘qimalarga berish xususiyati gemoglobin–kislorod dissotsiatsiya egri chizig‘i orqali ifodalanadi. Mazkur egri chiziqning holatiga pH, karbonat angidridning qisman bosimi, harorat va eritrotsitlardagi 2,3-bisfosfogliserat (2,3-BPG) miqdori kabi omillar ta’sir ko‘rsatadi. 2,3-BPG eritrotsitlarda glikolizdan tarmoqlanuvchi Rapoport–Luebering shunti orqali hosil bo‘lib, deoksigemoglobinning markaziy bo‘shlig‘iga birikadi va uning T-konformatsiyasini barqarorlashtiradi. Natijada gemoglobinning kislorodga affiniteti pasayib, O_2 ning periferik to‘qimalarga ajralishi osonlashadi. Mazkur narrativ sharhda 2,3-BPGning hosil bo‘lishi va metabolik boshqarilishi, gemoglobinning konformatsion holatiga ta’siri, dissotsiatsiya egri chizig‘idagi funksional o‘zgarishlar hamda gipoksiya, baland tog‘ sharoiti, anemiya, jismoniy yuklama va eritrotsitlarni saqlashdagi fiziologik hamda klinik ahamiyati tahlil qilinadi. Tahlil natijalari 2,3-BPG eritrotsit metabolizmi, gemoglobinning allosterik boshqarilishi va to‘qimalarga kislorod yetkazib berilishini o‘zaro bog‘lovchi muhim metabolik regulyator ekanligini ko‘rsatadi.

Kalit so‘zlar: 2,3-bisfosfogliserat, 2,3-BPG, gemoglobin, kislorod, O_2, gemoglobin–kislorod dissotsiatsiya egri chizig‘i, Rapoport–Luebering shunti, eritrotsit, gipoksiya, kislorod transporti.

2,3-БФГ И КРИВАЯ ДИССОЦИАЦИИ ОКСИГЕМОГЛОБИНА: ФИЗИОЛОГИЧЕСКОЕ И КЛИНИЧЕСКОЕ ЗНАЧЕНИЕ

Аннотация. Доставка кислорода из лёгких к периферическим тканям является важнейшим физиологическим процессом, обеспечивающим аэробный метаболизм клеток и нормальное функционирование организма. Основную роль в транспорте кислорода выполняет гемоглобин, который связывает O_2 в лёгких и высвобождает его в периферических тканях. Сродство гемоглобина к кислороду и способность отдавать его тканям характеризуются кривой диссоциации оксигемоглобина. На положение данной кривой влияют pH, парциальное давление углекислого газа, температура и концентрация 2,3-бисфосфоглицерата (2,3-БФГ) в эритроцитах. 2,3-БФГ образуется в эритроцитах посредством шунта Рапопорта–Люберинга, являющегося ответвлением гликолиза. Он связывается с дезоксигемоглобином в центральной полости и стабилизирует его Т-конформацию, вследствие чего снижается сродство гемоглобина к кислороду и облегчается высвобождение O_2 в периферических тканях.

В настоящем нарративном обзоре рассматриваются механизмы образования и метаболической регуляции 2,3-БФГ, его влияние на конформационное состояние гемоглобина и функциональные изменения кривой диссоциации оксигемоглобина. Особое внимание уделяется физиологическому и клиническому значению данного метаболита при гипоксии, пребывании на больших высотах, анемии, физических нагрузках и хранении эритроцитов. Результаты анализа литературы свидетельствуют о том, что 2,3-БФГ является важным метаболическим регулятором, связывающим метаболизм эритроцитов, аллостерическую регуляцию гемоглобина и доставку кислорода тканям.

Ключевые слова: 2,3-бисфосфоглицерат, 2,3-БФГ, гемоглобин, кислород, O_2, кривая диссоциации оксигемоглобина, шунт Рапопорта–Люберинга, эритроцит, гипоксия, транспорт кислорода.

2,3-BPG AND THE HEMOGLOBIN–OXYGEN DISSOCIATION CURVE: PHYSIOLOGICAL AND CLINICAL SIGNIFICANCE

Abstract. Oxygen delivery from the lungs to peripheral tissues is an essential physiological process that supports cellular aerobic metabolism and normal tissue function. Hemoglobin plays the primary role in oxygen transport by binding oxygen in the lungs and releasing it in peripheral tissues. Hemoglobin oxygen affinity and its capacity to release oxygen are described by the hemoglobin–oxygen dissociation curve. The position of this curve is influenced by several factors, including pH, carbon dioxide partial pressure, temperature, and the concentration of 2,3-bisphosphoglycerate (2,3-BPG) in erythrocytes. 2,3-BPG is produced in erythrocytes through the Rapoport–Luebering shunt, a branch of glycolysis. It binds to deoxygenated hemoglobin within its central cavity and stabilizes the T-state conformation. Consequently, hemoglobin oxygen affinity decreases, facilitating oxygen release to peripheral tissues. This narrative review examines the formation and metabolic regulation of 2,3-BPG, its effects on hemoglobin conformation, functional changes in the hemoglobin–oxygen dissociation curve, and its physiological and clinical significance in hypoxia, high-altitude exposure, anemia, physical exercise, and red blood cell storage. The literature analysis indicates that 2,3-BPG is an important metabolic regulator linking erythrocyte metabolism, allosteric regulation of hemoglobin, and tissue oxygen delivery.

Keywords: 2,3-bisphosphoglycerate, 2,3-BPG, hemoglobin, oxygen, O_2, hemoglobin–oxygen dissociation curve, Rapoport–Luebering shunt, erythrocyte, hypoxia, oxygen transport.

KIRISH

Kislorodning o‘pkadan to‘qimalarga yetkazilishi va to‘qimalarda hosil bo‘lgan karbonat angidridning o‘pkaga qaytarilishi nafas olish hamda qon aylanish tizimlarining eng muhim fiziologik funksiyalaridan biridir. Kislorod transportida asosiy vazifani eritrotsitlar tarkibidagi gemoglobin bajaradi. Gemoglobinning murakkab oqsil tuzilishi unga kislorodni qaytar tarzda biriktirish va organizmning metabolik ehtiyojiga muvofiq ravishda ajratib berish imkonini yaratadi.

Gemoglobinning kislorod bilan bog‘lanishi kooperativ xususiyatga ega. Kislorodning dastlabki molekulalari gemoglobinga birikkandan so‘ng keyingi O_2 molekulalarining bog‘lanishi osonlashadi. Aynan shu xususiyat gemoglobin–kislorod

dissotsiatsiya egri chizig‘ining S-simon shaklda bo‘lishini ta’minlaydi. Gemoglobinning kislorodga affiniteti doimiy ko‘rsatkich emas, balki eritrotsit metabolizmi va to‘qimalarning mahalliy fiziologik sharoitlariga qarab o‘zgarib turadi [1, 3, 6].

To‘qimalarda metabolik faollik ortishi natijasida karbonat angidrid va vodorod ionlari konsentratsiyasi ko‘payadi, harorat ko‘tariladi. Ushbu o‘zgarishlar gemoglobinning kislorodga affinitetini pasaytirib, O_2 ning faol metabolizm kechayotgan to‘qimalarga ajralishini osonlashtiradi. Mazkur jarayonda eritrotsitlarda hosil bo‘ladigan 2,3-bisfosfogliserat ham muhim o‘rin tutadi [1, 6, 8].

2,3-BPG glikoliz bilan bog‘liq Rapoport–Luebering shunti orqali hosil bo‘ladigan metabolit bo‘lib, gemoglobinning allosterik boshqarilishida ishtirok etadi. U deoksigemoglobinning markaziy bo‘shlig‘iga birikib, T-konformatsiyani barqarorlashtiradi. Natijada gemoglobinning kislorodga affiniteti pasayadi va periferik to‘qimalarga kislorod ajralishi kuchayadi [1, 3, 7].

Mazkur mavzuning dolzarbligi shundaki, 2,3-BPG eritrotsitlarning metabolik faoliyati bilan gemoglobinning kislorod tashish xususiyatlari o‘rtasidagi bevosita funksional bog‘liqlikni ta’minlaydi. Uning fiziologik ahamiyati gipoksiya, baland tog‘ sharoiti, anemiya, jismoniy yuklama va qon komponentlarini saqlash jarayonlarida yaqqol namoyon bo‘ladi. Mavjud ilmiy adabiyotlarda ushbu jarayonlarning ayrim jihatlari alohida o‘rganilgan bo‘lsa-da, ularni eritrotsit metabolizmi, gemoglobinning allosterik boshqarilishi va to‘qimalarga kislorod yetkazib berilishi nuqtayi nazaridan yaxlit tizim sifatida tahlil qilish muhim ilmiy ahamiyatga ega.

Shu munosabat bilan ushbu maqolaning maqsadi 2,3-BPGning eritrotsitlarda hosil bo‘lish va metabolik boshqarilish mexanizmlarini, gemoglobinning konformatsion holati hamda kislorodga affinitetiga ta’sirini, dissotsiatsiya egri chizig‘idagi funksional o‘zgarishlarni va turli fiziologik hamda klinik sharoitlardagi ahamiyatini ilmiy adabiyotlar asosida tahlil qilishdan iborat.

MAVZU BO‘YICHA ADABIYOTLAR TAHLILI

2,3-BPGning gemoglobin funksiyasidagi o‘rni uzoq yillardan buyon fiziologiya va biokimyo fanlarining muhim tadqiqot yo‘nalishlaridan biri hisoblanadi. Dastlabki tadqiqotlarda eritrotsitlardagi 2,3-BPG miqdori bilan gemoglobinning kislorodga affiniteti o‘rtasida teskari bog‘liqlik mavjudligi aniqlangan. Xususan, Brewer tomonidan olib borilgan tadqiqotlarda 2,3-BPGning gemoglobinning kislorod bilan o‘zaro ta’sirini boshqarishdagi ahamiyati keng yoritilgan [1].

Gemoglobinning kislorod bilan bog‘lanish mexanizmini tushuntirishda Perutz tomonidan ishlab chiqilgan strukturaviy va funksional yondashuv alohida ahamiyatga ega. Ushbu tadqiqotlar gemoglobinning T va R konformatsion holatlari o‘rtasidagi o‘tishlarni tushunishga ilmiy asos yaratgan. 2,3-BPGning deoksigemoglobinga birikishi T-holatni barqarorlashtiradi va oqsilning kislorodga affinitetini pasaytiradi [10].

Goodford, St-Louis va Wootton tomonidan o‘tkazilgan tadqiqotlarda 2,3-BPG, adenozintrifosfat va boshqa organik fosfatlarning gemoglobinning kislorod dissotsiatsiya egri chizig‘iga ta’siri miqdoriy jihatdan tahlil qilingan. Ushbu ishlar gemoglobinning kislorodga affinitetini boshqarishda eritrotsit ichidagi metabolitlarning muhim rolini ko‘rsatadi [3]. MacDonaldning tadqiqotida esa eritrotsitlarda 2,3-BPG miqdori, kislorodga affinitet, pH, karbonat angidrid va harorat o‘rtasidagi o‘zaro bog‘liqlik batafsil ko‘rib chiqilgan [8].

Eritrotsit metabolizmining 2,3-BPG hosil bo‘lishidagi ahamiyati keyingi ilmiy ishlarda yanada kengroq yoritilgan. Xususan, Mulquiney, Bubb va Kuchel tomonidan taklif etilgan matematik model 2,3-BPG metabolizmining fermentativ boshqarilishini va eritrotsit ichidagi metabolik jarayonlarning murakkabligini ochib beradi [9]. Zamonaviy tadqiqotlarda esa eritrotsit metabolizmi nafaqat hujayrani energiya bilan ta’minlash, balki gemoglobinning kislorodga affinitetini boshqarish nuqtayi nazaridan ham o‘rganilmoqda [2, 7].

Chatzinikolaou va hammualliflarining 2024-yildagi sharhida eritrotsit metabolizmining asosiy yo‘llari, jumladan glikoliz, pentoza-fosfat yo‘li va redoks muvozanatining hujayra funksiyasiga ta’siri tahlil qilingan [2]. Lyu va hammualliflarining tadqiqotida esa eritroid hujayralarning rivojlanishi, metabolik boshqarilishi va turli gematologik kasalliklar bilan bog‘liq jihatlar yoritilgan [7].

2,3-BPGning klinik ahamiyati eritrotsitlarni saqlash jarayonida ham namoyon bo‘ladi. Hessning tadqiqotida saqlanayotgan eritrotsitlar sifatini baholash mezonlari, metabolik o‘zgarishlar va funksional xususiyatlar ko‘rib chiqilgan [4]. Högman, Löf va Meryman tomonidan o‘tkazilgan tadqiqotlarda esa eritrotsitlarni saqlash davomida 2,3-BPG miqdorini yaxshiroq saqlab qolishga qaratilgan yondashuvlar o‘rganilgan [5]. Zolla va hammualliflarining ishida eritrotsitlarni saqlash jarayonida yuz beradigan metabolik, membranaviy va proteomik o‘zgarishlar kompleks tarzda tahlil qilingan [11].

Jaafar va hammualliflarining 2025-yilda e’lon qilingan sharhida 2,3-BPGning kislorodga affinitetni boshqarishdagi o‘rni, anemiya va baland tog‘ sharoitiga moslashuvdagi ahamiyati hamda uni aniqlash usullari bilan bog‘liq masalalar muhokama qilingan [6].

Umuman olganda, tahlil qilingan adabiyotlar 2,3-BPGning eritrotsit metabolizmi va gemoglobin funksiyasi o‘rtasidagi muhim bog‘lovchi ekanligini tasdiqlaydi. Shu bilan birga, uning turli fiziologik va patologik sharoitlarda boshqa allosterik omillar bilan birgalikdagi ta’sirini kompleks baholash zarurati saqlanib qolmoqda.

METODOLOGIYA

Mazkur tadqiqot narrativ adabiyotlar sharhi shaklida amalga oshirildi. Tadqiqot metodologiyasi 2,3-BPGning eritrotsitlarda hosil bo‘lishi va metabolik boshqarilishi, gemoglobin bilan o‘zaro ta’siri, kislorodga affinitetga ta’siri hamda

fiziologik va klinik ahamiyatiga oid ilmiy ma’lumotlarni izlash, saralash, qiyosiy tahlil qilish va umumlashtirishga asoslandi.

Adabiyotlarni izlash jarayonida PubMed/MEDLINE ma’lumotlar bazasi hamda ilmiy jurnallarning rasmiy nashriyot platformalarida chop etilgan ilmiy maqolalar va sharh ishlari ko‘rib chiqildi. Qidiruvda “2,3-bisphosphoglycerate”, “2,3-DPG”, “hemoglobin oxygen affinity”, “oxygen dissociation curve”, “Rapoport-Luebering shunt”, “erythrocyte metabolism”, “hypoxia”, “anemia”, “exercise” va “red blood cell storage” kabi kalit so‘zlardan foydalanildi.

Tahlil uchun eritrotsitlarda 2,3-BPG hosil bo‘lishi, gemoglobinning allosterik boshqarilishi, kislorod dissotsiatsiya egri chizig‘i, gipoksiya, baland tog‘ sharoiti, anemiya, jismoniy yuklama va eritrotsitlarni saqlash masalalariga bevosita aloqador manbalar tanlandi. Mavzuning fundamental mexanizmlarini tushuntiruvchi klassik tadqiqotlar zamonaviy ilmiy sharhlar bilan birgalikda o‘rganildi.

Tanlangan adabiyotlar quyidagi yo‘nalishlar bo‘yicha guruhlashtirildi: eritrotsitlarda 2,3-BPG hosil bo‘lishi va Rapoport–Luebering shunti; 2,3-BPGning gemoglobin bilan molekulyar o‘zaro ta’siri; gemoglobin–O_2 dissotsiatsiya egri chizig‘i va P50 ko‘rsatkichi; gipoksiya va baland tog‘ sharoitiga moslashuv; anemiyadagi kompensator mexanizmlar; jismoniy yuklama; eritrotsitlarni saqlash va transfuzion tibbiyot.

Ilmiy manbalardan olingan ma’lumotlar tematik va qiyosiy tahlil usullari asosida umumlashtirildi. Bunda 2,3-BPG metabolizmi, gemoglobinning konformatsion holati, kislorodga affinitet va periferik to‘qimalarga kislorod yetkazib berilishi o‘rtasidagi funksional bog‘liqlikka asosiy e’tibor qaratildi.

Tadqiqotda yangi eksperimental ma’lumotlar olinmadi va statistik meta-tahlil o‘tkazilmadi. Shu sababli natijalar mavjud ilmiy manbalarning narrativ sintezi va fiziologik mexanizmlarning qiyosiy tahliliga asoslanadi. Adabiyotlarni tanlash va talqin qilishdagi selektivlik ehtimoli ushbu tadqiqotning metodologik cheklovlaridan biri hisoblanadi.

NATIJALAR

Gemoglobin va kislorodning o‘zaro ta’siri. Gemoglobinning kislorod bilan bog‘lanishi uning to‘rtlamchi tuzilishidagi konformatsion o‘zgarishlar bilan chambarchas bog‘liq. Deoksigemoglobin nisbatan past kislorod affinitetiga ega bo‘lgan T-holatda mavjud bo‘ladi. Kislorodning gem tarkibidagi temir bilan bog‘lanishi natijasida gemoglobin molekulasida konformatsion o‘zgarish yuz beradi va yuqori affinitetli R-holat shakllanadi. Ushbu jarayon gemoglobinning kooperativ bog‘lanish xususiyatini ta’minlaydi [10].

Gemoglobinning kislorodga affinitetini baholashda P50 ko‘rsatkichi muhim ahamiyatga ega. P50 gemoglobinning 50 foizi kislorod bilan to‘yingan holatga mos keladigan kislorodning qisman bosimini ifodalaydi. P50 ko‘rsatkichining oshishi gemoglobinning kislorodga affiniteti pasayganini, kamayishi esa affinitet ortganini bildiradi. Shu sababli dissotsiatsiya egri chizig‘ining o‘ngga siljishi P50 ortishi va

kislorodning to‘qimalarga osonroq ajralishi bilan, chapga siljishi esa P50 kamayishi va gemoglobinning kislorodni kuchliroq ushlab turishi bilan tavsiflanadi.

Eritrotsitlarda 2,3-BPG hosil bo‘lishi. Yetuk eritrotsitlarda mitoxondriyalar mavjud emasligi sababli ularning asosiy energiya manbai anaerob glikoliz hisoblanadi. Glyukoza Embden–Meyerhof yo‘li orqali parchalanadi. Mazkur metabolik yo‘ldan tarmoqlanuvchi Rapoport–Luebering shunti esa 2,3-BPG sintezini ta’minlaydi [2, 7].

Glikolizning odatiy yo‘lida 1,3-bisfosfogliserat 3-fosfogliseratga aylanish jarayonida ATP hosil bo‘ladi. Rapoport–Luebering shuntida esa 1,3-bisfosfogliseratning bir qismi 2,3-BPG hosil bo‘lishiga yo‘naltiriladi. Ushbu jarayonda bisfosfogliserat mutaza va bisfosfogliserat fosfataza fermentlari ishtirok etadi [2, 7].

Mazkur metabolik yo‘lning o‘ziga xos jihati shundaki, 1,3-bisfosfogliseratning shunt orqali o‘tishi glikolizning ATP hosil qiluvchi bosqichini chetlab o‘tadi. Demak, 2,3-BPG hosil bo‘lishi ma’lum energiya sarfi bilan bog‘liq bo‘lsa-da, u gemoglobinning kislorodga affinitetini boshqarish imkonini beradi [7, 9].

Shunday qilib, eritrotsit metabolizmi faqat hujayraning energiya ehtiyojini qondirishga emas, balki gemoglobinning kislorod tashish xususiyatlarini muvofiqlashtirishga ham xizmat qiladi.

2,3-BPGning gemoglobinga ta’sir mexanizmi. 2,3-BPG manfiy zaryadlangan organik fosfat bo‘lib, asosan deoksigemoglobinning markaziy bo‘shlig‘iga birikadi. Uning gemoglobinning β-zanjirlari bilan elektrostatik o‘zaro ta’siri T-konformatsiyani barqarorlashtiradi. Natijada gemoglobinning yuqori affinitetli R-konformatsiyaga o‘tishi nisbatan qiyinlashadi va kislorodga affiniteti pasayadi [1, 3, 10].

Mazkur mexanizmni quyidagi ketma-ketlikda ifodalash mumkin:

2,3-BPG miqdorining ortishi → deoksigemoglobin bilan bog‘lanishning kuchayishi → T-holatning barqarorlashishi → Hb–O_2 affinitetining pasayishi → kislorodning to‘qimalarga ajralishining osonlashishi.

Demak, 2,3-BPG kislorodni bevosita tashuvchi modda emas, balki gemoglobinning kislorodni biriktirish va ajratish xususiyatlarini boshqaruvchi allosterik regulyator hisoblanadi.

2,3-BPG va gemoglobin–kislorod dissotsiatsiya egri chizig‘i. Eritrotsitlarda 2,3-BPG konsentratsiyasi oshganda gemoglobinning kislorodga affiniteti kamayadi. Natijada gemoglobin–kislorod dissotsiatsiya egri chizig‘i o‘ngga siljiydi va P50 ko‘rsatkichi ortadi. Bunday sharoitda ma’lum kislorodning qisman bosimida gemoglobin O_2 ni to‘qimalarga osonroq ajratadi [1, 3].

Aksincha, 2,3-BPG miqdorining kamayishi gemoglobinning kislorodga affinitetini oshiradi. Bunda dissotsiatsiya egri chizig‘i chapga siljishi va kislorodning to‘qimalarga ajralishi qiyinlashishi mumkin.

2,3-BPG holati	Gemoglobinning O_2 ga affiniteti	Egri chiziq holati	To‘qimalarga O_2 berilishi
↑ 2,3-BPG	Pasayadi	O‘ngga siljiydi	Osonlashadi
Normal miqdor	Me’yorida	Normal holatda	Fiziologik me’yorda

↓ 2,3-BPG	Ortadi	Chapga siljiydi	Qiyinlashishi mumkin

Ushbu bog‘liqlik 2,3-BPGning gemoglobinning kislorodni periferik to‘qimalarga berish xususiyatini boshqarishdagi ahamiyatini ko‘rsatadi.

Gipoksiya va baland tog‘ sharoitida 2,3-BPGning ahamiyati. Gipoksiya to‘qimalarning kislorod bilan yetarli darajada ta’minlanmasligi bilan tavsiflanadi. Bunday sharoitda organizm kislorod yetkazib berilishini saqlashga qaratilgan bir qator kompensator mexanizmlarni ishga tushiradi. Eritrotsitlardagi 2,3-BPG miqdorining o‘zgarishi ushbu moslashuv mexanizmlarining muhim metabolik tarkibiy qismi hisoblanadi [1, 6].

Baland tog‘ sharoitida atmosfera bosimining pasayishi natijasida inspirator kislorodning qisman bosimi kamayadi. Organizm bunga nafas olish, yurak-qon tomir tizimi va eritrotsit metabolizmidagi o‘zgarishlar orqali moslashadi. 2,3-BPG miqdorining ortishi gemoglobinning kislorodga affinitetini pasaytirib, mavjud kislorodning periferik to‘qimalarga ajralishini osonlashtirishi mumkin [1, 6].

Shu bilan birga, 2,3-BPGning ta’sirini baland tog‘ sharoitidagi barcha moslashuv jarayonlarini izohlovchi yagona mexanizm sifatida qarash to‘g‘ri emas. Bunda nafas olish, qon aylanishi, eritropoez va boshqa metabolik jarayonlar ham muhim ahamiyatga ega.

Anemiyada 2,3-BPGning fiziologik ahamiyati. Anemiyada gemoglobin konsentratsiyasining kamayishi qonning umumiy kislorod tashish sig‘imini pasaytiradi. Bunday vaziyatda organizm mavjud gemoglobindan samaraliroq foydalanishga intiladi. 2,3-BPG miqdorining ortishi gemoglobinning kislorodga affinitetini kamaytirib, mavjud kislorodning to‘qimalarga ajralishini osonlashtirishi mumkin [1, 6].

Biroq ushbu kompensator mexanizm gemoglobin konsentratsiyasining kamayishini to‘liq qoplay olmaydi. Chunki 2,3-BPG kislorod tashuvchi gemoglobin miqdorini oshirmaydi, balki uning kislorodni ajratish xususiyatini modulyatsiya qiladi. Shu sababli anemiyada 2,3-BPGning o‘zgarishini moslashuv mexanizmlaridan biri sifatida baholash maqsadga muvofiq.

Jismoniy yuklama vaqtida 2,3-BPGning o‘rni. Jismoniy faoliyat davomida mushaklarning kislorodga ehtiyoji ortadi. Metabolik faollik kuchayishi natijasida CO_2 va H^+ hosil bo‘lishi ko‘payadi, mahalliy harorat ko‘tariladi. Ushbu omillar gemoglobinning kislorodga affinitetini pasaytirib, faol ishlayotgan mushaklarga kislorod ajralishini osonlashtiradi.

2,3-BPG gemoglobinning kislorodga affinitetini boshqaruvchi eritrotsit ichidagi metabolik omil sifatida ushbu jarayonda ishtirok etadi. Biroq jismoniy yuklama vaqtida kislorod ajralishining o‘zgarishini faqat 2,3-BPG bilan izohlash mumkin emas. pH, PCO_2 va harorat kabi omillar ham muhim rol o‘ynaydi [8].

2,3-BPG va Bohr effekti. Gemoglobinning kislorodga affinitetini boshqarishda 2,3-BPG bilan bir qatorda pH va karbonat angidrid ham muhim ahamiyatga ega. To‘qimalarda CO_2 hosil bo‘lishining ortishi va H^+ ionlari konsentratsiyasining

ko‘payishi gemoglobinning kislorodga affinitetini kamaytiradi. Ushbu hodisa Bohr effekti deb ataladi.

Haroratning ortishi ham gemoglobinning kislorodga affinitetini pasaytirib, O_2 ning to‘qimalarga ajralishini osonlashtiradi. Demak, 2,3-BPG, pH, CO_2 va harorat birgalikda gemoglobinning kislorod bilan o‘zaro ta’sirini metabolik faol to‘qimalarning ehtiyojiga moslashtiradi [1, 8].

Qon komponentlarini saqlashda 2,3-BPGning ahamiyati. Eritrotsitlarni saqlash davomida ularning metabolik va funksional holatida turli o‘zgarishlar yuz beradi. Xususan, saqlash jarayonida 2,3-BPG miqdorining kamayishi gemoglobinning kislorodga affinitetini oshirib, dissotsiatsiya egri chizig‘ining chapga siljishiga olib kelishi mumkin [4, 5, 8].

2,3-BPG miqdorining kamayishi saqlanayotgan eritrotsitlarning kislorodni to‘qimalarga berish xususiyatiga ta’sir qiluvchi muhim omillardan biridir. Shu sababli qon komponentlarini saqlash texnologiyalarini takomillashtirishda 2,3-BPG va ATP kabi metabolik ko‘rsatkichlarni saqlab qolish masalalariga alohida e’tibor qaratiladi [4, 5, 11].

Biroq transfuzion eritrotsitlarning klinik samaradorligini faqat 2,3-BPG miqdori bilan baholash yetarli emas. Saqlash davomida membrana yaxlitligi, energiya almashinuvi, oksidlovchi stress va boshqa biokimyoviy jarayonlarda ham o‘zgarishlar sodir bo‘ladi. Shu sababli eritrotsitlarni saqlash bilan bog‘liq o‘zgarishlar ko‘p omilli jarayon sifatida baholanishi lozim [4, 5, 11].

MUHOKAMA

O‘rganilgan ilmiy manbalar va fiziologik mexanizmlarning qiyosiy tahlili 2,3-BPG eritrotsit metabolizmi bilan gemoglobinning kislorodga affinitetini o‘zaro bog‘lovchi muhim allosterik regulyator ekanligini ko‘rsatadi. Uning asosiy fiziologik ta’siri deoksigemoglobinning T-konformatsiyasini barqarorlashtirish va natijada gemoglobinning kislorodni ajratish xususiyatini o‘zgartirish orqali namoyon bo‘ladi [1, 3, 6].

2,3-BPG miqdorining ortishi dissotsiatsiya egri chizig‘ining o‘ngga siljishi va P50 ko‘rsatkichining oshishi bilan bog‘liq. Bu holat ma’lum kislorod bosimida gemoglobinning O_2 ni osonroq ajratishiga imkon beradi. Bunday mexanizm gipoksiya, baland tog‘ sharoiti va ayrim anemik holatlarda fiziologik moslashuvning muhim tarkibiy qismi hisoblanadi. Biroq 2,3-BPG miqdorining ortishi qonning umumiy kislorod tashish sig‘imini oshirmaydi. Uning asosiy vazifasi mavjud gemoglobinning kislorodni to‘qimalarga berish xususiyatini modulyatsiya qilishdan iborat [1, 6].

Anemiya sharoitida mazkur mexanizm alohida ahamiyat kasb etadi. Gemoglobin konsentratsiyasining kamayishi qonning kislorod tashish imkoniyatini pasaytiradi, 2,3-BPG esa qolgan gemoglobindan kislorod ajralishini osonlashtirishi mumkin. Shuning uchun ushbu metabolik o‘zgarishni kompensator mexanizm

sifatida baholash lozim. Uni anemiyaning asosiy sababini bartaraf etuvchi yoki gemoglobin yetishmovchiligini to‘liq qoplaydigan jarayon sifatida talqin qilish mumkin emas.

Tahlil davomida aniqlangan muhim jihatlardan yana biri shundaki, 2,3-BPGning ta’siri boshqa allosterik omillardan mustaqil holda namoyon bo‘lmaydi. pH, karbonat angidridning qisman bosimi va harorat gemoglobinning kislorodga affinitetiga birgalikda ta’sir ko‘rsatadi [1, 8]. Shu sababli gemoglobin–kislorod dissotsiatsiya egri chizig‘idagi o‘zgarishlarni baholashda bir nechta fiziologik omillarni hisobga olish talab etiladi.

Eritrotsit metabolizmi nuqtayi nazaridan 2,3-BPGning ahamiyati uning hujayra ichidagi metabolik jarayonlar bilan gemoglobinning funksional holati o‘rtasida bog‘liqlik hosil qilishida namoyon bo‘ladi. Rapoport–Luebering shunti orqali 2,3-BPG hosil bo‘lishi glikolizning ATP ishlab chiqaruvchi bosqichidan ma’lum darajada chetlanish hisobiga amalga oshadi. Bu esa eritrotsit metabolizmi energiya almashinuvi bilan cheklanib qolmasdan, kislorod transportini ham boshqarishda ishtirok etishini ko‘rsatadi [2, 7, 9].

Eritrotsitlarni saqlash jarayonida 2,3-BPG miqdorining kamayishi gemoglobinning kislorodga affinitetiga ta’sir ko‘rsatishi mumkin. Biroq saqlash bilan bog‘liq funksional o‘zgarishlar faqat ushbu metabolit bilan belgilanmaydi. ATP miqdori, hujayra membranasining yaxlitligi, oksidlovchi stress va boshqa biokimyoviy o‘zgarishlar ham eritrotsitlarning transfuzion sifatiga ta’sir ko‘rsatadi. Shu sababli storage lesion deb ataluvchi holat ko‘p omilli jarayon sifatida ko‘rib chiqilishi kerak [4, 5, 11].

Ayrim tadqiqotlarda eritrotsitlarni saqlash davomida 2,3-BPG va ATP miqdorini yaxshiroq saqlashga qaratilgan usullar o‘rganilgan [5]. Biroq biokimyoviy ko‘rsatkichlarning saqlanishi ularning barcha klinik transfuzion natijalarni avtomatik ravishda yaxshilashini anglatmaydi. Shu bois laborator ko‘rsatkichlar bilan bir qatorda klinik samaradorlikni ham baholash muhimdir.

Zamonaviy ilmiy tadqiqotlarda 2,3-BPG metabolizmining turli fiziologik va patologik holatlardagi o‘zgarishlari, uning eritrotsitlarning metabolik faolligi va kislorod transportiga ta’siri o‘rganilmoqda [2, 6, 7]. Biroq ushbu jarayonlarning o‘zaro bog‘liqligini, xususan, metabolik regulyatsiya va klinik natijalar o‘rtasidagi munosabatni yanada chuqurroq o‘rganish zarur.

Mazkur tadqiqot narrativ sharh xususiyatiga ega bo‘lib, unda yangi eksperimental natijalar olinmagan va meta-tahlil o‘tkazilmagan. Shu sababli xulosalar turli ilmiy manbalardagi ma’lumotlarning tematik va qiyosiy sinteziga asoslanadi. Kelgusida 2,3-BPG darajasining turli kasalliklarda o‘zgarishi, uning boshqa metabolik ko‘rsatkichlar bilan bog‘liqligi va transfuzion tibbiyotdagi klinik ahamiyatini eksperimental hamda klinik tadqiqotlar orqali chuqurroq o‘rganish maqsadga muvofiq.

Umuman olganda, 2,3-BPG eritrotsit metabolizmi, gemoglobinning allosterik boshqarilishi va to‘qimalarning kislorod bilan ta’minlanishini yagona fiziologik

tizimga birlashtiruvchi muhim metabolik regulyator hisoblanadi. Uning ta'sirini to'g'ri tushunish kislorod transportining fiziologik mexanizmlarini izohlash bilan bir qatorda gipoksiya, anemiya va transfuzion tibbiyotga oid klinik jarayonlarni baholashda ham muhim ahamiyat kasb etadi.

XULOSA

Mazkur narrativ sharh natijalari 2,3-BPG eritrotsit metabolizmi va gemoglobinning kislorod tashish funksiyasi o'rtasidagi muhim funksional bog'lovchi ekanligini ko'rsatdi. Eritrotsitlarda glikoliz bilan bog'liq Rapoport–Luebering shunti orqali hosil bo'ladigan 2,3-BPG deoksigemoglobinning T-konformatsiyasini barqarorlashtirib, gemoglobinning kislorodga affinitetini kamaytiradi va periferik to'qimalarga O_2 ajralishini osonlashtiradi [1, 7, 10].

2,3-BPG miqdorining ortishi gemoglobin–kislorod dissotsiatsiya egri chizig'ining o'ngga siljishi va P50 ko'rsatkichining oshishi bilan bog'liq. Aksincha, uning kamayishi gemoglobinning kislorodga affinitetini oshirib, egri chiziqning chapga siljishiga olib kelishi mumkin. Shu bilan birga, ushbu o'zgarishlarni faqat 2,3-BPG bilan izohlash mumkin emas, chunki pH, karbonat angidridning qisman bosimi va harorat kabi omillar ham gemoglobinning kislorodga affinitetini boshqarishda ishtirok etadi [1, 3, 8].

2,3-BPGning fiziologik ahamiyati gipoksiya, baland tog' sharoiti va ayrim anemik holatlarda mavjud kislorodning to'qimalarga berilishini yaxshilovchi kompensator mexanizm sifatida namoyon bo'ladi. Biroq u qonning umumiy kislorod tashish sig'imini oshirmaydi, balki mavjud gemoglobinning kislorodni ajratish xususiyatini modulyatsiya qiladi.

Eritrotsitlarni saqlash jarayonida 2,3-BPG miqdorining kamayishi gemoglobinning kislorodga affinitetini oshirishi va kislorodning to'qimalarga ajralish xususiyatini o'zgartirishi mumkin. Shu bilan birga, saqlash bilan bog'liq funksional o'zgarishlar metabolik, membranaviy va oksidlovchi jarayonlarning birgalikdagi ta'siri natijasida yuzaga keladi [4, 5, 11].

Umuman olganda, 2,3-BPG eritrotsit metabolizmi, gemoglobin konformatsiyasi va to'qimalarning kislorod bilan ta'minlanishini o'zaro bog'lovchi muhim fiziologik regulyator hisoblanadi. Shu sababli uning metabolizmini o'rganish biokimyo va fiziologiya bilan bir qatorda gipoksiya, anemiya hamda transfuzion tibbiyot kabi klinik yo'nalishlar uchun ham muhim ilmiy-amaliy ahamiyatga ega.

Kelgusidagi tadqiqotlarda 2,3-BPG darajasini boshqaruvchi metabolik omillarni aniqlash, turli patologik holatlarda uning o'zgarish mexanizmlarini chuqurroq o'rganish, laborator aniqlash usullarini standartlashtirish hamda eritrotsitlarni saqlash sharoitlarini optimallashtirishdagi klinik ahamiyatini baholash maqsadga muvofiq.

Foydalanilgan adabiyotlar:

1. Brewer G.J. 2,3-DPG and erythrocyte oxygen affinity. Annual Review of Medicine. 1974;25:29–38. DOI: 10.1146/annurev.me.25.020174.000333.

2. Chatzinikolaou E., et al. Erythrocyte metabolism. Acta Physiologica. 2024. DOI: 10.1111/apha.14081.

3. Goodford P.J., St-Louis J., Wootton R.W. A quantitative analysis of the effects of 2,3-diphosphoglycerate, adenosine triphosphate and inositol hexaphosphate on the oxygen dissociation curve of human haemoglobin. The Journal of Physiology. 1978;283:397–407. DOI: 10.1113/jphysiol.1978.sp012508.

4. Hess J.R. Measures of stored red blood cell quality. Vox Sanguinis. 2014;107(1):1–9. DOI: 10.1111/vox.12130.

5. Högman C.F., Löf H., Meryman H.T. Storage of red blood cells with improved maintenance of 2,3-bisphosphoglycerate. Transfusion. 2006;46(9):1543–1552. DOI: 10.1111/j.1537-2995.2006.00893.x.

6. Jaafar L.S., Kourie C.M.R., El-Mallah C.A., Obeid O. 2,3-Diphosphoglycerate: the forgotten metabolic regulator of oxygen affinity. British Journal of Nutrition. 2025;134(10):803–815. DOI: 10.1017/S0007114525105345.

7. Lyu J., Ni M., Weiss M.J., Xu J. Metabolic regulation of erythrocyte development and disorders. Experimental Hematology. 2024;131:104153. DOI: 10.1016/j.exphem.2024.104153.

8. MacDonald R. Red cell 2,3-diphosphoglycerate and oxygen affinity. Anaesthesia. 1977;32(6):544–553. DOI: 10.1111/j.1365-2044.1977.tb10002.x.

9. Mulquiney P.J., Bubb W.A., Kuchel P.W. Model of 2,3-bisphosphoglycerate metabolism in the human erythrocyte based on detailed enzyme kinetic equations: in vivo kinetic characterization of 2,3-bisphosphoglycerate synthase/phosphatase using 13C and 31P NMR. The Biochemical Journal. 1999;342(Pt 3):567–580.

10. Perutz M.F. Structure-function relations of human hemoglobins. Clinical Biochemistry. 1988;21(1):7–10.

11. Zolla L., D'Alessandro A., Rinalducci S., D'Amici G.M., Pupella S., Vaglio S., Grazzini G. Classic and alternative red blood cell storage strategies: seven years of "-omics" investigations. Blood Transfusion. 2015;13(1):21–31. DOI: 10.2450/2014.0053-14.