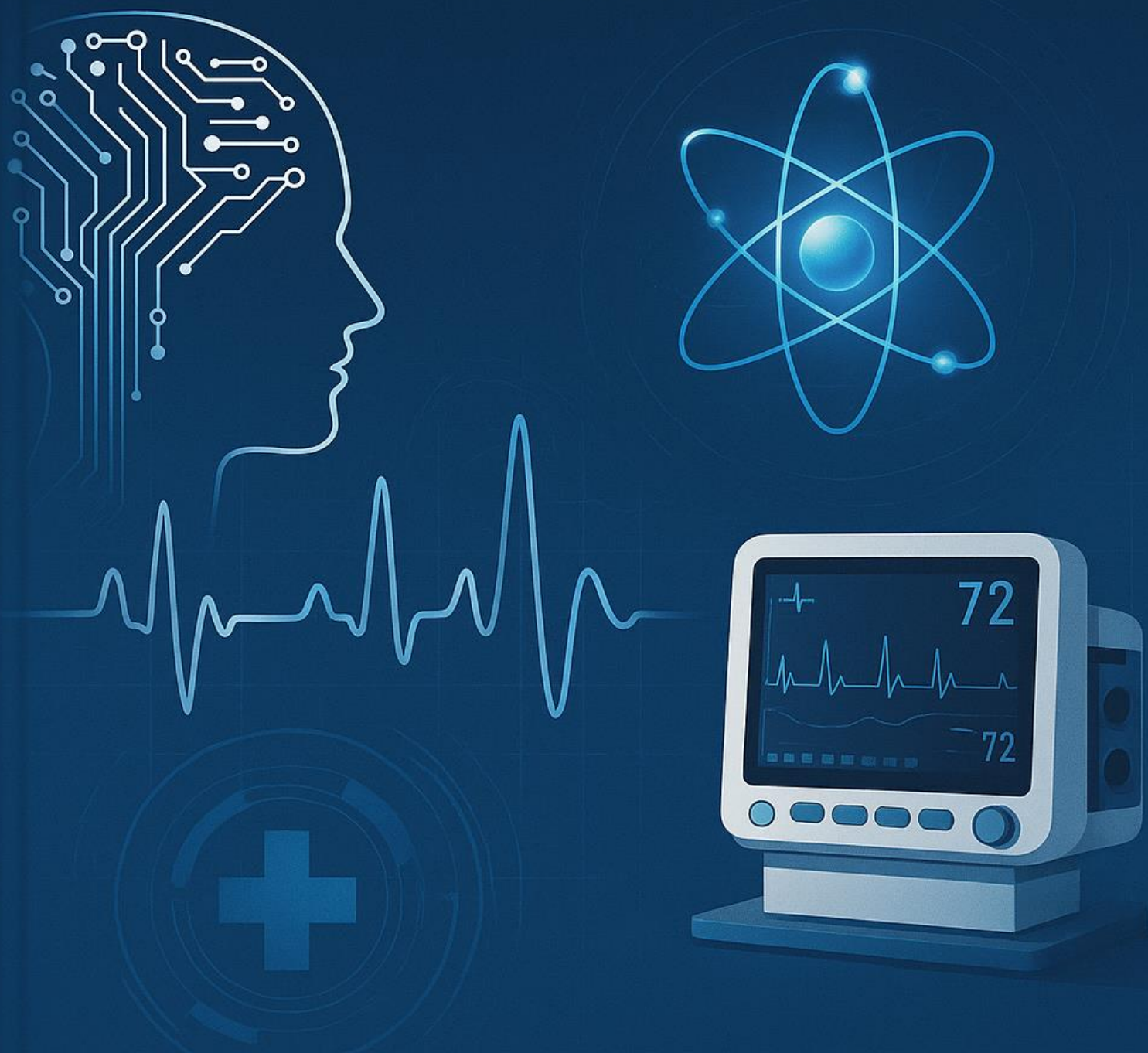


S. A. Usmonov

TIBBIYOT MUHANDISLIGI SOHASIGA FIZIKA FANINING INTEGRATSIYASI

MONOGRAFIYA



**O‘ZBEKISTON RESPUBLIKASI SOG‘LIQNI
SAQLASH VAZIRLIGI
FARG‘ONA JAMOAT SALOMATLIGI TIBBIYOT
INSTITUTI**

«TASDIQLAYMAN»

Sog‘liqni saqlash vazirligi

Ilmiy texnik kengashi raisi

_____ **Sh.K.Atadjanov**

«_____» _____ 2025 y.

USMONOV SAIDJON ABDUSUBXON O‘G‘LI

**TIBBIYOT MUHANDISLIGI SOHASIGA FIZIKA
FANINING INTEGRATSIYASI.**

(Monografiya)

Farg‘ona – 2025

Usmonov Saidjon Abdusubxon o'g'li

Monografiya, Farg'ona: 2025 yil. 129 sahifa.

Mazkur monografiya tibbiyot muhandisligi sohasida fizik fanlarning zamonaviy integratsiya mexanizmlarini chuqur ilmiy tahlil etishga bag'ishlangan bo'lib, unda biologik tizimlarda kechadigan asosiy fizik jarayonlarning matematik, elektromagnit, optik, akustik va mexanik modellar asosida o'rganilishi yoritiladi. Asarda MRI, KT, PET kabi diagnostik qurilmalar fizikasi, ultratovush va lazer texnologiyalarining tibbiyotdagi qo'llanishi, bioimpedans, bioelektrik jarayonlar, biomexanika, to'qimalarning dielektrik xususiyatlari hamda biotibbiy sensorlarning ishlash tamoyillari ilmiy asoslangan holda bayon etiladi. Shuningdek, CLIL, STEAM va loyihaviy o'qitish kabi metodlar yordamida fizik ta'limni biotibbiyot muhandisligi bilan uyg'unlashtirishning nazariy-metodik modeli ishlab chiqilgan. Virtual laboratoriyalar, moslashtirilgan amaliy stendlar va fanlararo kompetensiyalarni shakllantirish strategiyalari monografiyaning amaliy ahamiyatini oshiradi. Ushbu asar muhandislar, tadqiqotchilar, pedagoglar va tibbiy texnika sohasidagi mutaxassislar uchun mo'ljallangan ilmiy-amaliy qo'llanmadir.

Taqrizchilar:

Begmatova D. A

O'ZMU, "Umumiy fizika" kafedrası
mudiri pedagogika fanlari nomzodi,
professor.

Nosirov N. V

FJSTI "Biotibbiyot muhandisligi,
biofizika va axborot texnologiyalari"
kafedrası pedagogika fanlari bo'yicha
falsafa doktori.

Mundarija:

KIRISH.....	7
Mavzuning dolzarbligi va ilmiy-amaliy ahamiyati.....	9
Tadqiqotning maqsadi, ob'ekti, predmeti va metodologiyasi.....	11
Mavzuning o'rganilganlik darajasi.	12
Tadqiqotning ilmiy yangiligi va nazariy asoslari.....	14

I-BOB. FIZIKANING TIBBIYOT MUHANDISLIGI SOHASIDAGI

NAZARIY ASOSLARI

1.1	Biotibbiyot muhandisligining fanlararo aloqalari.....	16
1.1.1	Fizika–biologiya–muhandislik integratsiyasi.....	18
1.1.2	Biotibbiyot tizimlarining fizik platformasi.....	21
1.2	Tibbiy muhitdagi fizik jarayonlar.....	24
1.2.1	Organizmdagi oqimlar: Puazeyl qonuni.....	27
1.2.2	Qon bosimi va gidrodinamika modellar.....	30
1.2.3	Tana to'qimalarida issiqlik almashinuvi (Furye qonuni)....	33
1.3	To'qimalarning elektromagnit xususiyatlari.....	35
1.3.1	Dielektrik xususiyatlar. Bioimpedans. Elektrofiziologiya...	38
1.4	Tibbiy diagnostikaning fizik modellari.....	41
1.4.1	Optik diagnostika.....	45
1.4.2	Ultratovush diagnostikasi	48
1.4.3	Elektromagnit diagnostika	51

II-BOB. BIOFIZIK USULLARNING MUHANDISLIKDA QO'LLANILISHI

2.1	Fizik optikaning tibbiy optikadagi amaliy ahamiyati	54
2.1.1	Tibbiy diagnostikada optik hodisalarning fizik asoslari.....	56
2.1.2	Amaliy tibbiyotda optik qurilmalar va texnologiyalar.....	59
2.2	Lazer texnologiyalarining tibbiy qo'llanilishi.....	62
2.2.1	Lazer jarrohlik. Lazer diagnostika. Tomir ichidagi lazer....	65

2.3	Elektrofizik usullar.....	68
2.3.1	EKG – miokard elektr modeli. EMG – mushak elektr faolligi. EEG – neyron elektrik dinamikasi.....	71
2.4	Ultratovush fizikasi.....	74
2.4.1	Piezoelektrik effekt. Doppler effekti. Akustik impedans modellashtirish.....	77

III-BOB. TIBBIY QURILMALARDA FIZIK QONUNLARNING INTEGRATSIYASI.

3.1	Diagnostic qurilmalar fizikasi.....	81
3.1.1	MRI fizikasi (NMR, rezonans, gradientlar). KT fizikasi (rentgen yutilish koeffitsienti). PET fizikasi (pozitron-annigilyatsiya modeli).....	84
3.2	Biotibbiy sensorlar.....	87
3.2.1	Optik sensorlar. Bioimpedans sensorlar. Nanobiosensorlar.....	90
3.3	Hayotiy - tibbiy ko'rsatkichlarni o'lchash fizikasi.....	94
3.3.1	Yurak ritmi sensorlari.....	98
3.3.2	O'pka ventilyatsiya monitoring.....	101

IV-BOB. INTEGRATSIYA ASOSIDA AMALIY TIBBIY TEXNOLOGIYALAR.

4.1	Sun'iy a'zolar fizikasi.....	103
4.2	Tibbiy robototexnikada fizik jarayonlar.....	106
4.3	Biotibbiyot muhandisligida fizik model yaratish.....	109

V-BOB. FIZIK TA'LIMNING BIOTIBBIYOT MUHANDISLIGIGA INTEGRATSIYA MODELLARI

5.1	CLIL, STEAM va loyihaviy o'qitish.....	113
5.2	Biotibbiyot muhandislariga mos modellar. Fizika laboratoriyalarini moslashtirish. Virtual laboratoriyalarni	

	qo‘llash.....	115
5.3	Integratsion muammolar va ularni bartaraf etish.....	119
	Tadqiqot natijalari asosida umumiy xulosa.....	123
	Foydalanilgan adabiyotlar ro‘yxati	125

KIRISH

XXI asr tibbiyot tizimi inson salomatligini saqlash va tiklash jarayonlarida yuqori aniqlikdagi diagnostik texnologiyalar, sun'iy intellektga asoslangan monitoring tizimlari, biotibbiy sensorlar, robotlashtirilgan jarrohlik komplekslari hamda murakkab terapevtik apparatlarning keng joriy etilishi bilan xarakterlanadi. Zamonaviy tibbiyotning bunday texnologik taraqqiyoti yangi avlod mutaxassislarini tayyorlashda tubdan yangicha yondashuvni talab etadi, chunki bugungi kunda tibbiy muhandislik sohasi shifokorlar, fiziklar, muhandislar, dasturchilar va biologlarning hamkorlikdagi ilmiy-amaliy faoliyati natijasida shakllanadigan multidissiplinar tizimga aylangan. Aynan shu jarayon natijasida biotibbiyot muhandisligi alohida fanlararo yo'nalish sifatida mustahkam o'rin egallab, inson organizmidagi fiziologik jarayonlar, tibbiy texnikaning ishlash tamoyillari va muhandislik tahlilining yagona konseptual platformada birlashishini ta'minlaydi.

Bugungi kunda biotibbiyot muhandisligining muvaffaqiyatli rivojlanishi eng avvalo fizika fanining tibbiyot uchun asosiy metodologik poydevor bo'lib xizmat qilishi bilan belgilanadi. Qon oqimining gidrodinamik xarakteristikalarini o'rganish, yurak mushaklarining elektrik-faollik asosidagi modellarini yaratish, to'qimalarning optik va dielektrik xossalarini tahlil qilish, ultratovush to'lqinlarining inson organizmidagi tarqalish qonuniyatlarini o'rganish, sun'iy organlar uchun biomexanik modellar ishlab chiqish, diagnostik tasvirlar (MRI, KT, PET) uchun elektromagnit maydonlarni matematik modellashtirish — bularning barchasi fizik qonuniyatlarning tibbiy texnologiyalar bilan chuqur integratsiyalashgan ko'rinishidir. Shunday ekan, biotibbiyot muhandisining kasbiy faoliyatida fizika fundamental bilim sifatida emas, balki murakkab muhandislik qarorlarini ishlab chiqish, tibbiy apparatlarni loyihalash, diagnostik tizimlarning parametrlarini optimallashtirish, raqamli simulyatsiyalar yaratish va tibbiy-texnik jarayonlarni boshqarishning asosiy vositasi sifatida namoyon bo'ladi.

Monografiyaning dolzarbligi shundan iboratki, O‘zbekiston oliy ta’lim tizimida biotibbiyot muhandisligi yo‘nalishini rivojlantirish, uning o‘quv rejalari, laboratoriya bazasi va ilmiy salohiyatini kuchaytirish bo‘yicha so‘nggi yillarda qator tashkiliy-huquqiy islohotlar amalga oshirilmoqda. Milliy innovatsion siyosatning ustuvor yo‘nalishlaridan biri sifatida tibbiy texnologiyalarni modernizatsiya qilish, zamonaviy tibbiy asbob-uskunalarni ishlab chiqarish, diagnostika va monitoring tizimlarini mahalliyashtirish, tibbiyotning raqamlashtirilgan infratuzilmasini kengaytirish bo‘yicha davlat darajasida katta e‘tibor qaratilmoqda. Bunday jarayon esa fizikani tibbiyotga integratsiya qilgan holda yangi avlod muhandislarini tayyorlashni talab etadi.

Ushbu monografiya ana shu ehtiyojlardan kelib chiqib, fizik ta’limning biotibbiyot muhandisligi sohasiga qanday ilmiy-metodik asoslarda integratsiyalanishini chuqur o‘rganishga qaratilgan. Asarda fizik jarayonlarning to‘qimalar, organlar, fiziologik tizimlar va diagnostik apparatlar bilan o‘zaro ta’siri ilmiy yondashuv asosida yoritilib, integratsion modellar, laboratoriya tizimlari, virtual tajribalar, CLIL–STEAM–loyihaviy ta’lim yondashuvlarining roli izchil tahlil qilinadi. Shuningdek, fizik modellarni yaratish, ularni biotibbiyot jarayonlariga tatbiq qilish, o‘lchashlar tizimining muhandislik arxitekturasini va zamonaviy tibbiyotda qo‘llaniladigan optik, elektromagnit, akustik, mexanik diagnostika usullarining fizik mohiyati chuqur o‘rganiladi.

Monografiyada integratsion yondashuvning amaliy natijalariga alohida e‘tibor qaratilgan bo‘lib, ularda moslashtirilgan fizika laboratoriyalari, biofizik modellar, sensor texnologiyalar bilan ishlash bo‘yicha amaliy ko‘nikmalar, diagnostik qurilmalar fizikasi, sun‘iy organlar mexanikasi, tibbiy robototexnika jarayonlarining fizik tahlili kabi yo‘nalishlar bo‘yicha real ilmiy metodlar keltirilgan. Bundan tashqari, monografiya fizika fanining biotibbiyot muhandisligini o‘qitishda pedagogik integratsiya modeli sifatida qanday ishlashi, ya’ni o‘quv metodikasi, laboratoriya jihozlari, virtual simulyatsiyalar, fanlararo

bogʻliqlik va kompetensiyaga asoslangan taʼlim tizimi doirasida qanday natijalar berishi mumkinligini ham ilmiy asosda koʻrsatib beradi.

Shu maʼnoda, ushbu monografiya biotibbiyot muhandisligi taʼlimi boʻyicha ilmiy izlanishlar olib borayotgan tadqiqotchilar, oliy taʼlim muassasalari oʻqituvchilari, tibbiy texnika mutaxassislari, fizika va muhandislik fanlari boʻyicha ilmiy xodimlar hamda tibbiyotning innovatsion yoʻnalishlariga qiziquvchi keng auditoriya uchun moʻljallangan ilmiy-amaliy qoʻllanmadir.

Mavzuning dolzarbligi va ilmiy-amaliy ahamiyati.

Tibbiyot sohasida kechayotgan global texnologik oʻzgarishlar, inson salomatligini saqlash va tiklash jarayonida yuqori aniqlikdagi tibbiy asbob-uskunalar, sunʼiy intellektga asoslangan diagnostik platformalar, robotlashtirilgan jarrohlik tizimlari, biotibbiy sensorlar va raqamli monitoring qurilmalarining keng joriy etilishi natijasida, biotibbiyot muhandisligi mustaqil fanlararo yoʻnalish sifatida jadal rivojlanmoqda. Ushbu texnologik taraqqiyotning markazida fizika fani turib, aynan fizik qonuniyatlar tibbiy texnikaning ishlash tamoyillarini, diagnostik jarayonlarning funksional mexanizmlarini, fiziologik tizimlardagi tabiiy jarayonlarning matematik modellarini hamda tibbiy apparatlarning konstruktiv parametrlarini belgilab beradi. Shunday ekan, fizika fanini biotibbiyot muhandisligi sohasi bilan chuqur integratsiya qilish bugungi kunda nafaqat zarurat, balki sogʻliqni saqlash tizimining texnologik rivojini taʼminlovchi strategik ehtiyojdir.

Mavzuning dolzarbligi avvalo shundan iboratki, zamonaviy tibbiyotning deyarli barcha diagnostik, terapevtik va monitoring tizimlari fizik jarayonlarga asoslanadi. Masalan, rentgen tasvirlash texnologiyasi fotonlar va moddalar oʻrtasidagi yutilish koeffitsientlariga, kompyuter tomografiyasi nurlanish intensivligining fazoviy rekonstruksiyasiga, magnit-rezonans tomografiya yadro spinlarining elektromagnit maydonlardagi rezonansiga, ultratovush diagnostikasi

akustik to'liqlarning tarqalish qonuniyatlariga, lazer terapiyasi esa optik energiyaning to'qimalar tomonidan yutilish va issiqlikka aylanish jarayonlariga tayanadi. Bu texnologiyalarni chuqur tushunish va rivojlantirish esa fizik bilimlarsiz mumkin emas. Shu bois fizika fanining biotibbiyot muhandisligiga integratsiyasi zamonaviy tibbiy texnologiyalarni rivojlantirishda fundamental ahamiyatga ega.

Dolzarblikning yana bir muhim jihati – O'zbekiston sog'liqni saqlash tizimining modernizatsiya qilinishi, tibbiy xizmatlarning sifatini oshirish, diagnostika vositalarini mahalliyashtirish, tibbiy texnikani sertifikatlash va texnik xizmat ko'rsatish tizimini takomillashtirish bo'yicha davlat miqyosida olib borilayotgan islohotlar bilan bog'liqdir. Bu jarayonda biotibbiyot muhandislarining roli alohida ahamiyat kasb etadi, chunki zamonaviy tibbiy texnika murakkab fizik, elektron, mexanik va kompyuter tizimlarining uyg'unlashuvidan iborat bo'lib, ularni to'g'ri sozlash, diagnostika qilish, xavfsiz ishlatish va modernizatsiya qilish uchun maxsus integrativ bilim talab etiladi. Fizika ta'limining biotibbiyot muhandisligi bilan integratsiyalashgan holda o'qitilishi shunday mutaxassislarni tayyorlashda hal qiluvchi omil bo'lib xizmat qiladi.

Mavzuning ilmiy ahamiyati shundan iboratki, ushbu monografiyada fizika fanining biotibbiyot muhandisligi tizimiga integratsiyasi nafaqat metodik va didaktik jarayon sifatida, balki ilmiy konsepsiya sifatida ham ko'rib chiqilib, fiziologik jarayonlarning fizik modellarini yaratish, to'qimalarning elektromagnit va optik xossalarni o'rganish, biomexanik tizimlarning matematik modellarini ishlab chiqish, qon oqimining gidrodinamik parametrlarini tahlil qilish, bioimpedans va bioelektrik jarayonlarni modellashtirish kabi fundamental ilmiy yo'nalishlar yoritilgan. Bunday tadqiqotlar natijasida fiziologik jarayonlarni fizik modellashtirishga oid yangi yondashuvlar shakllanadi, bu esa tibbiy qurilmalarning samaradorligini oshirish, xavfsizligini kuchaytirish, klinik diagnostika aniqligini yaxshilash va yangi tibbiy texnologiyalar yaratish imkonini beradi.

Monografiyaning amaliy ahamiyati esa fizik laboratoriyalarni biotibbiyot muhandisligi ehtiyojlariga moslashtirish, sensor texnologiyalari, diagnostik qurilmalar, robototexnika, sun'iy organlar, optik va akustik tizimlar, elektromagnit asboblardan iborat bo'yicha talabalar uchun amaliy asos yaratish bilan belgilanadi. CLIL, STEAM va loyihaviy ta'lim texnologiyalarining integratsiyasi natijasida talabalarda fizik jarayonlarni muhandislik nuqtai nazardan tahlil qilish, real tibbiy muammolarni fizik modellar orqali yechish, laboratoriya o'lchovlarini tizimli qayta ishlash, diagnostik jarayonlarni matematik simulyatsiya qilish kabi amaliy kompetensiyalar shakllanadi. Bu kompetensiyalar esa kelajakda tibbiyot texnikasining texnik ko'rsatkichlarini yaxshilash, yangi tibbiy sensorlar yaratish, diagnostik tizimlarni optimallashtirish, klinik monitoring aniqligini oshirish, tibbiy robototexnikani takomillashtirish kabi real amaliy vazifalarni bajarishda bevosita qo'l keladi.

Mazkur mavzuning dolzarbligi va ilmiy-amaliy ahamiyati fizika fanini biotibbiyot muhandisligi sohasi bilan uyg'unlashtirish natijasida yuqori texnologiyali tibbiy tizimlarni yaratish, diagnostika va terapevtik usullar samaradorligini oshirish, raqamli sog'liqni saqlash infratuzilmasini takomillashtirish va zamonaviy tibbiyotning texnik asoslarini mahalliyashtirishga xizmat qilishi bilan belgilanadi. Monografiya tibbiy texnologiyalarni yaratishning ilmiy asoslarini mustahkamlab, biotibbiyot muhandislarining kasbiy tayyorgarligini yangi bosqichga ko'tarishga qaratilgan dolzarb ilmiy-amaliy qo'llanmadir.

Tadqiqotning maqsadi, ob'ekti, predmeti va metodologiyasi.

Tadqiqotning maqsadi. Mazkur tadqiqotning asosiy maqsadi tibbiyot muhandisligi ta'limi uchun fizik fanlarni chuqur integratsiya qiluvchi ilmiy-metodik modelni ishlab chiqish, fizik jarayonlarning biologik tizimlar va tibbiy texnologiyalar bilan o'zaro bog'liqligini asoslash, diagnostik va terapevtik qurilmalar fizikasi orqali biotibbiyot muhandislarida kasbiy kompetensiyalarni

rivojlantirish hamda zamonaviy CLIL, STEAM va loyihaviy yondashuvlar asosida integrativ fizika ta'limining samarali konsepsiyasini yaratishdan iboratdir.

Tadqiqotning ob'ekti. Tadqiqotning ob'ekti sifatida biotibbiyot muhandisligi ta'lim tizimi, uning tarkibiy elementlari — fundamental fizika kurslari, tibbiy texnologiyalar, diagnostik uskunalar, biotibbiy sensorlar, laboratoriya amaliyotlari va o'quv jarayonining integratsiyalashgan metodik strukturalari belgilandi.

Tadqiqotning predmeti. Tadqiqot predmeti — fizik qonuniyatlarning biologik to'qimalar, fiziologik tizimlar, tibbiyotda qo'llaniladigan diagnostik va terapevtik qurilmalar, optik, akustik, elektromagnit va mexanik jarayonlar bilan o'zaro uyg'unligini ta'minlovchi integratsiyalashgan ta'lim modeli, shuningdek, biotibbiyot muhandislarining kasbiy tayyorgarligida fizik bilimlarning amaliy tatbiq mexanizmlaridir.

Tadqiqotning metodologiyasi. Tadqiqot metodologiyasi fanlararo tahlil, tizimli yondashuv, fizik modellashtirish, biomexanik va bioelektrik jarayonlarni matematik tahlil qilish, o'lchovlar va diagnostik qurilmalarni funksional tadqiq etish, pedagogik eksperiment, o'quv jarayonini loyihalash, CLIL–STEAM texnologiyalari asosida kompetensiyalarni shakllantirish metodlari, virtual laboratoriyalarni qo'llash, tibbiy texnikaning fizika asoslarini simulyatsiya qilish hamda ilmiy-nazariy manbalarni qiyosiy tahlil qilish usullariga tayandi.

Mavzuning o'rganilganlik darajasi

Fizika fanining biotibbiyot muhandisligi sohasi bilan integratsiyasi bo'yicha ilmiy izlanishlar asosan XX asrning ikkinchi yarmidan boshlab, tibbiy texnologiyalarning fizik qonuniyatlarga asoslangan holda keng rivojlanishi bilan bir vaqtda shakllana boshladi. Dastlabki tadqiqotlar tibbiy tasvirlash texnologiyalari (rentgen, KT, MRI), bioelektrik jarayonlarning nazariy modellari (Hodgkin–Huxley, FitzHugh–Nagumo), suyuqlik mexanikasining fiziologik tizimlardagi qo'llanilishi, ultratovush fizikasi, to'qimalarning optik va dielektrik

xossalari bo'yicha o'tkazilgan bo'lib, ular asosan fundamental fizik modellarni biologik jarayonlarga tatbiq qilish bilan cheklangan.

Xalqaro miqyosda fizik jarayonlarning tibbiyotga integratsiyasi bo'yicha Webster, Bushberg, Bronzino, Kandel, Plonsey, Rangayyan, Haidekker kabi olimlarning ishlari ilmiy maktab sifatida shakllangan bo'lib, ular tibbiy tasvirlash fizikasi, biotibbiyot signallari, biomexanika, bioelektrik tizimlar, biomedikal asboblarning konstruksiyasi, fiziologik modellashtirish kabi yo'nalishlarni chuqur o'rgangan. Shu bilan birga, elektromagnit diagnostika, optik spektroskopiya, ultratovush akustikasi, nano- va mikrotexnologiyalarning tibbiyotdagi qo'llanishi bo'yicha so'nggi yillarda keng ko'lamli tadqiqotlar olib borilgan.

MDH ilmiy maktablari doirasida biofizika, bioelektromagnetizm, to'qimalarning dielektrik xossalarni o'rganish, fiziologik tizimlar modellashtirish va diagnostik asboblarning fizikasi bo'yicha G. Frank, A. Samsonov, L. Gurevich, V. Makarov kabi olimlar tomonidan olib borilgan izlanishlar alohida ahamiyatga ega.

O'zbekiston ilmiy tarmoqlarida biofizika, tibbiy asboblarning texnologiyasi, tibbiy optika va diagnostik tizimlarning ayrim yo'nalishlari bo'yicha qator tadqiqotlar amalga oshirilgan bo'lsa-da, fizik ta'limning biotibbiyot muhandisligi sohasiga kompleks integratsiyasini, ayniqsa didaktik model darajasida chuqur yorituvchi monografik ishlar deyarli mavjud emas. Shu sababli ushbu mavzu ilmiy jihatdan yetarli darajada o'rganilmagan bo'lib, aynan fizik fanlarning tibbiy texnologiyalar bilan bog'lanish mexanizmi, integratsion laboratoriya tizimlari, fanlararo kompetensiyalarni shakllantirish, virtual laboratoriyalarni tibbiy muhandislik ta'limiga joriy etish bo'yicha kompleks tadqiqotlar vatanimizda hozircha kam uchraydi. Yuqoridagi holat mazkur monografiyaning ilmiy dolzarbligini yanada oshirib, mavzuning o'rganilganlik darajasida mavjud bo'shliqni to'ldirish zaruriyatini ko'rsatadi.

Tadqiqotning ilmiy yangiligi va nazariy asoslari.

Mazkur monografiyaning ilmiy yangiligi fizik ta'limni biotibbiyot muhandisligi sohasi bilan chuqur integratsiya qilish bo'yicha kompleks, ko'p bosqichli va ilmiy asoslangan konseptual modelning birinchi marta tizimli ravishda ishlab chiqilganida namoyon bo'ladi. Monografiyada ilgari lokal yoki qisman tibbiy yo'nalishlarda o'rganilgan fizik jarayonlar yagona didaktik, muhandislik va ilmiy modellar bilan integratsiyalangan holda ko'rib chiqildi.

Tadqiqotning ilmiy yangiligini quyidagi asosiy jihatlar tashkil etadi:

1. Biotibbiyot muhandisligi uchun moslashtirilgan fizik ta'limning konseptual modeli birinchi marta tizimli ravishda ishlab chiqildi. Model fizik modellar, laboratoriya tizimlari, sensor texnologiyalari, diagnostik apparatlar, virtual simulyatsiya va fanlararo integratsiya tamoyillariga tayangan holda taklif qilindi.
2. Fiziologik jarayonlarning fizik modellashtirishiga oid yangi didaktik yondashuv ishlab chiqildi. Qon oqimi, to'qima dielektrik xossalari, bioimpedans, ultratovush tarqalishi, optik yutilish, elektromagnit rezonans kabi jarayonlar nafaqat fizik, balki o'quv-metodik integratsiya modeli sifatida ham tizimlashtirildi.
3. CLIL, STEAM va loyihaviy o'qitishning biotibbiyot muhandisligi kontekstidagi integratsiyasi ilmiy asosda ishlab chiqildi. Bu yondashuvlarning fizik ta'limga mos kelishi, ularning kompetensiyaga asoslangan ta'lim bilan uyg'unlashuvi amaliy jihatdan asoslab berildi.
4. Biotibbiyot muhandisligi uchun moslashtirilgan fizik laboratoriyalar modeli birinchi bor kompleks tarzda ishlab chiqildi. Biomexanik stendlar, bioelektrik modellar, optik fantomlar, ultratovush modellar, gidrodinamik tizimlar va diagnostik qurilmalar bilan ishlash bo'yicha integratsiyalashgan amaliy yondashuvlar taklif qilindi.

5. Tibbiy texnologiyalarni o'qitishda virtual laboratoriyalarni qo'llashning ilmiy asoslangan modeli yaratildi. MRI, KT, PET, bioimpedans, optik spektroskopiya, mikrofluidika va akustik tizimlarning virtual modellashtirish tizimi o'quv jarayoniga ilmiy yondashuv asosida tatbiq etildi.
6. Integratsion muammolarni hal etishning tizimli strategiyasi ishlab chiqildi. Fanlararo nomutanosiblik, infratuzilma yetishmasligi, kompetensiya muammolari, laboratoriya resurslari cheklanganligi kabi masalalar bo'yicha ilmiy asoslangan yechimlar taklif qilindi.

Monografiyaning nazariy asoslari fizikaning klassik bo'limlari — mexanika, elektrodinamika, optika, akustika, issiqlik fizikasi — bilan bir qatorda zamonaviy tibbiy texnologiyalar fizikasiga tayangan holda ishlab chiqilgan. Shuningdek, fiziologik tizimlarning matematik modellarini yaratishda Nyuton mexanikasi, Maksvell tenglamalari, Puazeyl tenglamasi, Navye–Stoks tizimi, Furiye tenglamasi, elektromagnit rezonans nazariyasi, akustik tarqalish tenglamalari kabi fundamental fizik qonuniyatlar asos bo'ldi. Didaktik model esa kompetensiyaga asoslangan ta'lim, fanlararo integratsiya, laboratoriya-pedagogik tizimlar va raqamli ta'lim metodologiyalariga tayanadi.

I-BOB. FIZIKANING TIBBIYOT MUHANDISLIGI SOHASIDAGI NAZARIY ASOSLARI

1.1. Biotibbiyot muhandisligining fanlararo aloqalari.

Biotibbiyot muhandisligi zamonaviy fanlar tizimida keng ko‘lamli integratsiyaga ega bo‘lgan murakkab, ko‘p qatlamli va multidissiplinar yo‘nalish hisoblanib, uning ilmiy asosi tabiiy fanlar, texnika fanlari hamda tibbiy-biologik fanlarning o‘zaro uzviy bog‘lanishi orqali shakllanadi, chunki inson organizmida kechadigan fiziologik jarayonlarni chuqur tushunish, ularni tahlil qilish, o‘lchash, modellashtirish hamda muhandislik yechimlariga tatbiq etish doimo turli fanlarning hamkorligini talab qiladi. Mazkur sohada fizika fani asosiy metodologik poydevor sifatida namoyon bo‘lib, elektrodinamika, optika, akustika, mexanika, termodinamika va kvant fizikasi qonuniyatlarining tibbiy diagnostika, terapevtik texnologiyalar va biomuhandislik jarayonlariga tatbiqi orqali turli tibbiy qurilmalar yaratiladi, biologik to‘qimalarning fizik xususiyatlari o‘rganiladi, fiziologik signallarni qayd etish va tahlil qilish algoritmlari ishlab chiqiladi. Shu bilan birga, biotibbiyot muhandisligi matematik modellashtirish, differensial tenglamalar, statistik tahlil, ehtimollar nazariyasi, chiziqli algebra va hisoblash matematikasiga asoslangan bo‘lib, yurak-qon tomir tizimining gemodinamik modeli, mushak-tomir tizimining mexanik xususiyatlari yoki neyron impulslarining tarqalish jarayonlarini aniq matematik modellarda ifodalash, kompyuter simulyatsiyalari orqali tibbiy tashxisni optimallashtirish va klinik protokollarni yaxshilash imkonini beradi.

Biotibbiyot muhandisligi biologiya fani bilan ham o‘zaro uzviy bog‘liq bo‘lib, hujayra membranalarining elektr faoliyati, oqsillar konformatsiyasi, bioenergetika, to‘qimalarning reologik xususiyatlari, moddalar almashinuvining fizik-kimyoviy mexanizmlari, genetik axborotning molekulyar uzatilish jarayonlari kabi murakkab biologik hodisalarni o‘rganish, ularga turli fizik tahlil usullarini qo‘llash va natijalarni muhandislik tizimlariga tatbiq etish aynan biologik fanlar bilan hamkorlik orqali amalga oshadi, chunki biomateriallar yaratish, sun‘iy organlar

loyihalash, regenerativ tibbiyot texnologiyalarini ishlab chiqish, biokompatibil polimerlar va nanostrukturalarning xossalarini tekshirish doimo biologik mexanizmlarni chuqur tahlil qilishni talab qiladi. Kimyo fani bilan fanlararo integratsiya esa biomateriallarning fizik-kimyoviy tarkibini o'rganish, elektrolit eritmalarni modellashtirish, dori shakllarining biofizik xatti-harakatini baholash, ion kanallari orqali ionlarning harakatlanish mexanizmlarini o'rganish, biosensorlar uchun faol materiallar yaratish va nanomeditsina uchun zarur bo'lgan nanokompozitlar ishlab chiqishda namoyon bo'ladi.

Texnikaviy fanlar bilan aloqadorlik biotibbiyot muhandisligining eng muhim jihatlaridan biri bo'lib, elektronika, mikroprotsessor texnologiyalari, signalni qayta ishlash, avtomatika, robototexnika, mekatronika va axborot texnologiyalari bilan uzviy bog'langandir. Aynan ushbu sohalarning integratsiyasi tufayli kompyuter tomografiyasi, magnit-rezonans tomografiya, ultratovush diagnostikasi, elektroensefalografiya, elektrokardiografiya, optik koherent tomografiya, robotlashtirilgan jarrohlik tizimlari, sun'iy yurak apparatlari, nogironlar uchun robot protezlari, reabilitatsion ekzoskeletlar kabi murakkab va yuqori texnologik tibbiy qurilmalar yaratildi, chunki har bir qurilma fizik tamoyillar, elektron modullar, dasturiy boshqaruv, algoritmik qayta ishlash va mexanik konstruksiyaning uyg'unlashuviga asoslanadi. Bunga qo'shimcha ravishda, tibbiyot informatikasi, biostatistika va sun'iy intellekt bilan o'zaro aloqalar klinik ma'lumotlarni qayta ishlash, kasalliklarni erta aniqlash, ularga tavakkal modellarini yaratish, tibbiy tasvirlarni avtomatik tahlil qilish, telemeditsina va masofaviy monitoring tizimlarini joriy etishda hal qiluvchi o'rinni egallaydi.

Biotibbiyot muhandisligining fanlararo tabiatini chuqurroq tushuntirish uchun uning klinik tibbiyot bilan uzviy bog'liqligini ham alohida qayd etish lozim bo'lib, klinik jarrohlik, kardiologiya, nevrologiya, pulmonologiya, onkologiya, endokrinologiya va boshqa ko'plab yo'nalishlarda qo'llanilayotgan zamonaviy texnologiyalar aynan muhandislik va fizika yutuqlariga tayanadi. Masalan, yurak

ritmini tiklashda qo'llaniladigan elektroimpuls terapiya qurilmalari elektr maydonining biologik to'qimalarga ta'siri qonuniyatlarini tahlil qilishga asoslanadi, radioterapiya jarayonida gamma-nurlar va proton nurlari to'qimalar bilan o'zaro ta'sirining fizik asoslari hisobga olinadi, neyroxirurgiyada stereotaktik tizimlarning ishlashi koordinatalar geometriyasi va fazoviy aniqlik tizimlariga asoslanadi, oftalmologiyada excimer lazerlarining kornea to'qimasi bilan o'zaro ta'siri optik fizika qonuniyatlari orqali tavsiflanadi, gemodializ apparatlarining ishlash mexanizmi esa membranalarining diffuziya va osmoz jarayonlariga asoslanadi. Shu sababli biotibbiyot muhandisligi nafaqat nazariy fanlararo integratsiyani, balki real klinik amaliyotga to'g'ridan-to'g'ri tatbiq etiladigan amaliy integratsiyani ham talab qiladi.

Yana bir muhim fanlararo bog'liqlik antropometriya, ergonomika va biokimyo bilan ham kuzatiladi, chunki inson tanasi parametrlari, bo'g'inlarning biomekanik xususiyatlari, mushaklar kuchlanishi, to'qimalar elastikligi va mushak-skelet tizimining yuklanishga javobi fiziologiya, anatomiyaga oid bilimlar bilan uyg'un holda o'rganiladi. Bu ma'lumotlar protezlar, ortopedik moslamalar, reabilitatsiya qurilmalari va tibbiy robotlar uchun optimal konstruktsiyalar yaratishda muhim o'rin egallaydi. Shu tarzda biotibbiyot muhandisligi doirasida fanlararo integratsiya nafaqat ilmiy izlanishlar sifati va chegaralarini kengaytiradi, balki klinik amaliyotda yuqori samaradorlikka erishish, yangi texnologiyalar yaratish, mavjud diagnostik va terapevtik tizimlarni modernizatsiya qilishga imkon yaratadi.

1.1.1. Fizika–biologiya–muhandislik integratsiyasi.

Fizika, biologiya va muhandislik fanlarining integratsiyasi zamonaviy biotibbiyot muhandisligi fanining metodologik asosini tashkil qiladi, chunki inson organizmidagi fiziologik jarayonlar tabiatiga ko'ra fizik qonuniyatlarga bo'ysunadi, biologik strukturalarning tuzilishi va funksiyasi fizik jarayonlar bilan belgilanadi, muhandislik esa ushbu jarayonlarni o'lchash, modellashtirish, tahlil

qilish va amaliy qurilmalar ko'rinishida joriy etish imkonini yaratadi. Inson organizmida yuz beradigan eng oddiy jarayonlardan tortib murakkab molekulyar mexanizmlargacha bo'lgan hodisalar elektr, mexanik, akustik, issiqlik yoki optik tabiatga ega bo'lgani uchun ushbu jarayonlarni tushunish, ularni matematik modellar asosida aniqlash va muhandislik yechimlariga tatbiq etishda fizikaviy bilimlar hal qiluvchi o'rin egallaydi. Masalan, yurak mushaklarining impuls hosil qilishi va elektr signallarini tarqatishi elektrofiziologiya qonuniyatlari asosida sodir bo'ladi, qon oqimining tomirlarda harakatlanishi suyuqliklar mexanikasiga, mushaklarning qisqarishi biomexanika tamoyillariga, hujayra membranalarining ionlar o'tkazuvchanligi esa elektroximiyaga asoslanadi. Bu jarayonlar biologiya tomonidan o'rganilgan bo'lsa-da, ularni amaliy o'lchash, signallarni qayd etish va tahlil qilish, qurilmalar orqali monitoring qilishda fizika va muhandislikning chuqur integratsiyasi talab etiladi.

Biologiya fani inson hujayralari, to'qimalari, organlari, molekulyar tuzilmalari va fiziologik tizimlari haqidagi fundamental bilimlarni beradi, biroq ushbu biologik strukturalarning fizik xossalarini aniqlash, ularning issiqlik o'tkazuvchanligi, elastikligi, dielektrik ko'rsatkichlari, optik sinishi, elektr qarshiligi, akustik to'lqinlarga javobi kabi parametrlarini o'lchash faqat fizik tamoyillar orqali amalga oshiriladi. Shu sababli biologiyada kuzatiladigan har bir jarayon, xoh u DNK replikatsiyasi bo'lsin, xoh elektroimpulslarning neyronlar bo'ylab tarqalishi bo'lsin, o'zining chuqur fizik asosiga ega. Fizika fanining aynan biologiyadagi ushbu qonuniyatlarni tahlil etishi natijasida biofizika, biomexanika, bioinformatika, molekulyar fizika kabi ko'plab ilmiy yo'nalishlar rivojlandi, chunki biologik jarayonlarni oddiy kuzatish yetarli bo'lmay, ularni matematik modelga solish, fizik parametrlar orqali ifodalash, o'lchash va texnik qurilmalar yordamida qayta ishlash talab etiladi.

Muhandislik esa ushbu ikki soha orqali olingan bilimlarni real qurilmalar, klinik diagnostika tizimlari, rehabilitatsiya moslamalari, protezlar, biosensorlar, tibbiy

laboratoriya uskunalari, tasvirlash apparatlari, signalni qayta ishlash tizimlari ko‘rinishida amaliyotga tatbiq etishga xizmat qiladi. Masalan, optik fizikaga asoslangan lazer texnologiyalari oftalmologiyada ko‘z to‘qimalarini mikron darajada qayta shakllantirish imkonini bermoqda, magnit-rezonans tomografiyaning ishlash prinsipi atom yadrolarining magnit maydonidagi rezonansi bilan bog‘liq bo‘lib, fiziklarning kashfiyotlari orqali inson tana ichki tuzilmasini uch o‘lchamli yuqori aniqlikda tasvirlash imkonini yaratdi. Ultratovush diagnostika apparatlari akustik to‘lqinlarning to‘qimalardagi tarqalishiga asoslanadi, elektroensefalografiya va elektrokardiografiya esa asosan elektr maydoni, potentsiallar farqi va ularning vaqt bo‘yicha o‘zgarishini qayd etishga asoslanadi. Bularning barchasi fizik tamoyillarni to‘g‘ridan-to‘g‘ri klinik amaliyotga integratsiya qilgan klassik misollardir.

Fizika–biologiya–muhandislik integratsiyasining eng muhim natijalaridan biri zamonaviy tibbiy tasvirlash texnologiyalarining rivojlanishidir. Rentgen nurlari to‘qimalar tomonidan turlicha yutilishi fizik hodisa bo‘lib, tibbiy muhandislik ushbu jarayonni kompyuter tomografiyasi qurilmalarida uch o‘lchamli rekonstruksiya algoritmlariga tatbiq etadi. Optik koherent tomografiya interferensiya tamoyillariga asoslanadi, pozitronga-emissiya tomografiyasi esa yadro fizikasi jarayonlarini biologik metabolizmni kuzatishga yo‘naltiradi. Shuningdek, termografiya fizik issiqlik nurlanishiga asoslanib, yallig‘lanish o‘choqlarini aniqlashda qo‘llaniladi. Bularning barchasi integratsiyaning real, amaliy, ilmiy isbotlangan natijalaridir.

Biologik to‘qimalarning mexanik xususiyatlarini o‘rganish ham integratsiyaning muhim yo‘nalishidir, chunki mushak-skelet tizimi, bo‘g‘inlar, paylar, xaftaga va suyaklarning yuklanishga javobi mexanik qonuniyatlarga asoslanadi. Shu sababli biomexanika fani paydo bo‘lib, yurish biomexanikasi, sport tibbiyotida harakat tahlili, rehabilitatsiya protokollarining ilmiy asoslari, sun‘iy bo‘g‘inlar va protezlarning konstruktsiyasini yaratishda muhim o‘rin egallamoqda. Statik

yuklanish, dinamik qarshilik, to‘qimalarning elastiklik moduli, viskoelastiklik xossalari kabi parametrlar muhandislik amaliyotida qurilma yaratishning asosiy talablari hisoblanadi.

Fizika va biologiyaning integratsiyasi molekulyar darajada ham keng qo‘llaniladi. Masalan, hujayra membranalarining ion transporti Nernst–Plank tenglamalariga asoslanadi, kanal oqsillari orqali ionlarning o‘tishi elektr potensiallar farqi bilan boshqariladi, oksidlanish-qaytarilish reaksiyalarida energiya almashinuvi termodinamika qonunlari bilan tartibga solinadi, oqsillarning uchlamchi strukturasi stabil tutuvchi vodorod bog‘lari kvant mexanikasi asosida tushuntiriladi. Bu jarayonlarning har biri biologiya va fizikaning to‘liq birlashuvi mahsulidir.

Ushbu integratsiyaning yakuniy natijasi sifatida tibbiy amaliyot uchun mo‘ljallangan texnologiyalar, masalan, biosensorlar, elektrokimyoviy analizatorlar, biokompatibil implantlar, sirt-harakat robotlari, telemeditsina tizimlari, fiziologik signallarni qayd etish modullari, sun‘iy intellekt asosidagi biometrik tahlil algoritmlari yaratilmoqda. Bunda muhandislik fizik jarayonlarni texnik jihatdan amalga oshiruvchi strukturaviy yechimlar orqali joriy etadi, biologiya esa ushbu qurilmalar bilan o‘zaro ta’sirlashadigan tirik to‘qimalarning funksional va molekulyar xususiyatlarini aniqlaydi. Shu tariqa integratsiya klinik diagnostika, reabilitatsiya, jarrohlik va fundamental biotibbiy tadqiqotlar uchun yangi imkoniyatlar yaratmoqda.

1.1.2. Biotibbiyot tizimlarining fizik platformasi.

Biotibbiyot tizimlarining fizik platformasi zamonaviy tibbiyotda qo‘llanilayotgan diagnostik, terapevtik va reabilitatsion texnologiyalarning nazariy hamda amaliy asosini tashkil etib, ushbu platforma tirik organizmning fizik xususiyatlari, fiziologik jarayonlarning fizik tabiatini tushunish, biologik to‘qimalarning fizik parametrlarini o‘lchash, ularni matematik modellashtirish va

muhandislik tizimlariga tatbiq etishni o'z ichiga oladi. Har qanday biotibbiy qurilma, xoh u ultratovush skaneri bo'lsin, xoh magnit-rezonans tomografiyasi yoki elektrokardiografiya apparati bo'lsin, ularning ishlash mexanizmi fizik qonuniyatlar, energiya tashuvchilarning organizm bilan o'zaro ta'siri, signal hosil bo'lish jarayonlari va fizik o'lchash tamoyillariga tayanadi. Shu sababli biotibbiyot tizimlarining fizik platformasi tibbiy muhandislikning eng muhim metodologik poydevoridir.

Biotibbiy tizimlar faoliyatining markazida inson organizmiga xos bo'lgan elektr, mexanik, akustik, issiqlik, magnit va optik jarayonlarni aniqlash, qayd etish va tahlil qilish yotadi. Organizmning bioelektrik jarayonlari yurak mushaklari, miya neyronlari, mushak tolalari, hujayra membranalaridagi ionlar oqimi natijasida hosil bo'ladi. Ushbu bioelektrik hodisalar elektrofiziologiya tamoyillariga asoslanadi va ularni o'lchash uchun elektrodlar, kuchaytirgichlar, filtrlar, analog–raqam konvertorlari va signalni qayta ishlash algoritmlaridan foydalaniladi. Masalan, elektrokardiografiyada yurakning elektr faolligini qayd etish differensial signallarni o'lchashga asoslanib, teri va elektrod orasidagi kontakt impedansi, mushaklarning elektr shovqini, tashqi elektromagnit ta'sirlarni fizik filtrlar orqali kamaytirish jarayonlari orqali amalga oshiriladi. Elektromagnit asosdagi tizimlarning yana bir muhim yo'nalishi elektroensefalografiyadir, unda miya korteksi neyronlarining postsinaptik potensiallari juda kuchsiz bo'lgani sababli signallar yuqori sezuvchan kuchaytirgichlar, chastota bo'yicha ajratuvchi filtrlar, raqamli o'rtacha olish algoritmlari yordamida qayta ishlanadi. Ushbu apparatlar to'liq fizik tamoyillarga tayangan holda ishlaydi.

Optik fizikaga asoslangan biotibbiy tizimlar ham juda keng tarqalgan bo'lib, ular yorug'likning to'qimalardan aks etishi, singishi, yutilishi yoki interferensiya hodisalari orqali turli diagnostik ma'lumotlar olish imkonini beradi. Oftalmologiyada qo'llaniladigan optik koherent tomografiya interferensiya printsipiga asoslanib, nanometr darajasidagi to'qima qatlamlarining uch o'lchamli

tasvirini hosil qiladi. Lazer terapiyasi esa fototermal va fotokimyoviy ta'sir mexanizmlariga asoslanadi, bunda to'qimalardagi xromoforlar ma'lum to'lqin uzunliklaridagi lazer energiyasini yutadi va issiqlik shaklida qayta taqsimlaydi. Bu jarayonlar issiqlik o'tkazuvchanligi, difuziya tenglamalari va energiya taqsimoti qonunlari yordamida aniq modellashiriladi. Shuningdek, infraqizil spektroskopiya qonning kislorod bilan to'yinganligini aniqlashda, ya'ni pulsoksimetriyada keng qo'llaniladi. Bu texnologiya yorug'likning to'qimalarda turlicha yutilish koeffitsientiga asoslanadi.

Akustik fizikaga asoslangan ultratovush diagnostika tizimlari to'qimalar zichligi, elastikligi, akustik impedansi va to'lqinlarning tarqalish tezligi kabi parametrlarni o'lchash orqali ichki organlarning real vaqt rejimidagi tasvirini hosil qiladi. Bunda piezoelektrik kristallardan generatsiya qilinadigan yuqori chastotali mexanik to'lqinlar to'qimalar chegaralarida akslanadi va akslangan signallar qabul qilinib, qayta ishlanadi. Elastografiya texnologiyasida esa to'qimalarning qattiqlik darajasi akustik to'lqinlarni qo'zg'atish orqali o'lchanadi. Bu usul o'sma to'qimalari, fibroz jarayonlar yoki yallig'lanish natijasida zichligi o'zgargan hududlarni aniqlashda juda muhimdir. Bularning barchasi to'liq fizik qonunlar asosida ishlaydigan tizimlardir.

Magnit maydonlarga asoslangan biotibbiyot tizimlarining asosiy namunasi magnit-rezonans tomografiya bo'lib, uning ishlash printsipi yadrolarning tashqi magnit maydonga mos ravishda orientatsiyalanishi, radiochastotali impulslar ta'sirida energiya yutishi va qayta chiqarishi hodisalariga asoslanadi. Bu jarayonlar kvant fizikasi, elektromagnit induksiya, Faradey qonunlari, spin relaksatsiyasi, Larmor chastotasi kabi fundamental fizik tamoyillar yordamida izohlanadi. Shu sababli MRT fizik platformasi eng murakkab va o'ta nozik fizik qonuniyatlarni talab qiladigan biotibbiy tizimlardan biri hisoblanadi.

Issiqlik jarayonlariga asoslangan biotibbiyot tizimlari ham klinik amaliyotda keng qo'llanilib, ular organizmning termoregulyatsiya mexanizmlarini tahlil qilish,

yallig'lanish o'choqlarini aniqlash, jarohatlarning holatini baholash va o'smalarni differensial diagnostika qilishda ishlatiladi. Termografiya infraqizil nurlanishning to'qimalardan chiqish intensivligini o'lchaydi, bu esa o'z navbatida Stefan–Boltzmann qonuni, issiqlik taqsimoti tenglamalari va sirt nurlanish koeffitsientlari asosida baholanadi.

Biotibbiyot tizimlarining fizik platformasi biologik to'qimalar va tizimlarning mexanik xususiyatlarini o'rganishni ham o'z ichiga oladi. Biomexanika yurish-kelib chiqish mexanizmlari, bo'g'inlarning yuklanishga javobi, suyaklarning elastik moduli, mushaklarning kuchlanish–cho'zilish xususiyatlari kabi parametrlarni aniqlashga xizmat qiladi. Bu parametrlar FIK qonunlari, Nyuton mexanikasi, elastiklik nazariyasi, tensometrik o'lchash tizimlari yordamida aniqlanadi. Reabilitatsiya robotlari, protezlar va ortopedik moslamalar konstruksiyasi aynan ushbu mexanik parametrlarning aniq fizik o'lchovlariga asoslanadi.

Shu tariqa, biotibbiyot tizimlarining fizik platformasi tibbiy texnologiyalarning ilmiy asosini belgilovchi fundamental kompleks tizim bo'lib, organizmning fizik tabiatini chuqur tahlil qilish, biologik jarayonlarni fizik o'lchovlar orqali ifodalash va muhandislik yechimlariga tatbiq etish imkonini beradi. Bu platforma zamonaviy tibbiyotda qo'llanilayotgan ko'plab yuqori texnologiyali qurilmalar, raqamli diagnostika tizimlari, sun'iy intellekt asosidagi tahlillar va reabilitatsiya texnologiyalarining ishonchli ilmiy poydevoridir.

1.2. Tibbiy muhitdagi fizik jarayonlar.

Tibbiy muhitda sodir bo'ladigan fizik jarayonlar inson organizmi fiziologiyasini tushunish, kasalliklarni aniqlash, tibbiy diagnostika va davolash texnologiyalarini yaratish hamda ularni samarali qo'llash uchun hal qiluvchi ahamiyatga ega bo'lib, ushbu jarayonlar elektr, mexanik, issiqlik, optik, akustik va

elektromagnit tabiatga ega bo'lgan fundamental fizik hodisalarni o'z ichiga oladi. Tirik organizmda sodir bo'ladigan barcha hayotiy jarayonlar, xoh ular hujayra ichidagi ionlar harakati bo'lsin, xoh yurakning elektr faolligi yoki qon oqimining tomirlar bo'ylab harakati bo'lsin, o'zining qat'iy fizik qonuniyatlariga ega bo'lib, mazkur qonuniyatlarni chuqur anglash biotibbiyot muhandisligi uchun asosiy ilmiy poydevor hisoblanadi.

Tibbiy muhitdagi eng muhim fizik jarayonlardan biri bioelektrik jarayonlar bo'lib, ular hujayra membranasini orqali ionlar oqimining notekis taqsimlanishi natijasida paydo bo'ladi. Inson organizmidagi barcha qo'zg'aluvchan to'qimalar, xususan, miya neyronlari, yurak mushaklari va skelet mushaklari ion kanallari orqali natriy, kaliy, kaltsiy va xlor ionlarining membrana bo'ylab harakatiga asoslangan elektroximik jarayonlar orqali elektr signallarini hosil qiladi. Bu jarayonning fizik asosida diffuziya, osmoz, elektropotensial farqi va Nernst tenglamasi yotadi. Natijada yuzaga keladigan har bir elektr impuls fiziologik faoliyatning real ko'rsatkichi bo'lib, elektrokardiografiya, elektroensefalografiya, elektromiografiya kabi apparatlar aynan shu bioelektrik jarayonlarni o'lchashga asoslanadi. Bunday o'lchash jarayonlarida teri–elektrod chegarasidagi qarshilik, tashqi elektromagnit shovqinlar, to'qimadagi o'tkazuvchanlik farqlari kabi omillar fizik jihatdan muhim parametrlar hisoblanadi.

Tibbiy muhitning yana bir asosiy fizik jarayoni qon oqimining tomirlar bo'ylab harakatlanishidir. Bu jarayon suyuqliklar mexanikasi, ya'ni gidrodinamika qonunlariga bo'ysunadi. Qon tomirlaridagi oqimning laminar yoki turbulent xarakteri, bosimning arteriyalardan venalarga o'tish jarayonida pasayib borishi, tomir devorlarining elastik xususiyatlari, qonning viskoelastikligi va nisbiy yopishqoqligi Navye–Stoks tenglamalari bilan tavsiflanadi. Gemodinamik jarayonlar Poiseuille qonuni orqali arteriya ichida oqim tezligini aniqlash imkonini beradi, bu esa qon bosimini o'lchash, periferik qarshilikni tahlil qilish, yurak chiqishi va miokard faoliyatining mexanik xususiyatlarini baholashda juda

muhimdir. Gemodinamik jarayonlarning fizik asoslarini anglash dopplerografiya, ultratovush diagnostikasi va invaziv manometriya kabi tibbiy texnologiyalarni to'g'ri qo'llash imkonini beradi.

Issiqlik jarayonlari ham tibbiy muhitning ajralmas qismidir. Inson organizmi doimo issiqlik ishlab chiqaradi va uni atrof-muhit bilan almashadi. Termoregulyatsiya mexanizmlari issiqlik o'tkazish, konveksiya, radiatsiya va evaporatsiya jarayonlariga asoslanadi. Tibbiy texnologiyalarda bu jarayonlar termografiya, gipertermiya terapiyasi, krioterapiya, jarrohlikda elektrokoagulyatsiya kabi usullarda qo'llaniladi. Masalan, termografiya infraqizil nurlanishni qayd etib, to'qimalarning mahalliy harorati oshgan yallig'lanish o'choqlarini aniqlash imkonini beradi. Issiqlikning to'qima bo'ylab tarqalishi Fourye tenglamalari yordamida modellashiriladi. Gipertermiya jarayonida esa to'qimalar ma'lum haroratgacha qizdirilib, o'smalar hujayralari termik zararlanadi, buni esa issiqlik sig'imi, issiqlik o'tkazuvchanligi va to'qima zichligining fizik qiymatlari belgilaydi.

Optik jarayonlar tibbiy muhitda juda keng qo'llaniladi, chunki yorug'likning biologik to'qimalar bilan o'zaro ta'siri tibbiy tasvirlash va terapiya texnologiyalarining poydevoridir. Yorug'likning singishi, aks ettirilishi, yutilishi, sochilishi yoki interferensiyaga uchrashi kabi fizik hodisalar oftalmologiya, dermatologiya, onkologiya va kardiologiya amaliyotlarida keng qo'llaniladi. Masalan, lazer terapiyasi fototermal, fotomekanik yoki fotokimyoviy jarayonlarga asoslanadi. Optik koherent tomografiyada interferensiya hodisasidan foydalaniladi, bu turdagi tasvirlash retina, qon tomirlari va yumshoq to'qimalarning mikron darajasidagi strukturasini aks ettiradi. Yorug'likning to'qimalarda sochilishi Mie va Reyli nazariyalari orqali izohlanadi, bu esa optik diagnostika qurilmalarining texnik parametrlari va aniqligini belgilashda muhimdir.

Akustik jarayonlar ham tibbiyotda hal qiluvchi o'ringa ega bo'lib, ultratovush diagnostikasi aynan yuqori chastotali akustik to'lqinlarning to'qimalarda

tarqalishiga asoslanadi. Akustik to‘lqinlar to‘qimalarning zichligi, elastikligi va akustik impedansiga qarab akslanadi, singadi yoki tarqaladi. Shuning uchun ultratovush apparatlarida to‘lqin tezligi, amplituda va chastota kabi fizik parametrlar tasvirning sifatini belgilaydi. Elastografiyada akustik to‘lqinlar yordamida to‘qimalarning qattiqligi aniqlanadi, bu esa o‘sma to‘qimalari va fibroz jarayonlarning erta tashxisida katta ahamiyatga ega. Akustik jarayonlarning fiziologik asoslari eshitish tizimi, ichki quloqning mexanik rezonans mexanizmlari va ovozning qabul qilinishi jarayonlarida ham namoyon bo‘ladi.

Elektromagnit jarayonlar tibbiy muhitning eng murakkab, ammo eng ko‘p qo‘llaniladigan fizika yo‘nalishlaridan biridir. Rentgen nurlari to‘qimalardagi elektronlar bilan o‘zaro ta’sirlashib, fotoeffekt, Kompton sochilishi yoki ko‘p energiyali yutilish jarayonlari orqali tasvir hosil qiladi. Shu asosda rentgenografiya, kompyuter tomografiyasi va mammografiya ishlaydi. Magnit maydonlarga asoslangan MRT texnologiyasida esa yadrolarning spin xususiyati va radiochastotali energiya bilan o‘zaro ta’siri asosiy fizik jarayon hisoblanadi. Elektroimpedans tomografiyada to‘qimalarning elektr o‘tkazuvchanligi o‘lchanadi, bu esa ularning tuzilishidagi o‘zgarishlarni aniqlashga yordam beradi.

Tibbiy muhitdagi ushbu fizik jarayonlarni chuqur o‘rganish, matematik modellash, o‘lchash va texnologiyalashtirish natijasida inson organizmidagi fiziologik jarayonlar haqida aniq xulosalar chiqarish, kasalliklarni erta aniqlash, xavfsiz davolash protokollarini ishlab chiqish va tibbiy texnologiyalarni takomillashtirish imkoniyati paydo bo‘ladi. Shu bois tibbiy muhitdagi fizik jarayonlar biotibbiyot muhandisligi va tibbiy fizika fanlarining asosiy ilmiy va amaliy yo‘nalishini tashkil qiladi.

1.2.1. Organizmdagi oqimlar: Puazeyl qonuni

Inson organizmidagi suyuqliklar harakati, xususan qonning arteriyalar, venalar va kapillyarlar tizimi orqali oqib o‘tishi fiziologiyaning eng muhim

jarayonlaridan biri bo'lib, ushbu oqimlarning fizik tabiati suyuqliklar mexanikasi qonunlari yordamida izohlanadi. Qon aylanish tizimida kuzatiladigan oqimlarning asosiy matematik modeli sifatida Puazeyl qonuni alohida ahamiyat kasb etadi. Mazkur qonun ideal sharoitda, ya'ni silindrik naycha bo'ylab laminar oqim harakat qilayotganida, oqim tezligi, bosim farqi, naycha radiusi, suyuqlikning yopishqoqligi va oqim sarfi o'rtasidagi aniq fizik bog'liqlikni tavsiflaydi. Puazeyl qonuni gemodinamikani tahlil qilish, qon bosimi taqsimotini tushuntirish, arterial qarshilikni hisoblash va yurak faoliyati mexanizmlarini anglashda fundamental o'rin tutadi.

Laminar oqim holatida suyuqlikning har bir zarrachasi qatlamlar bo'ylab tartibli harakatlanadi, bu esa qon oqimidagi ichki ishqalanish kuchlarining bir xil taqsimlanishini hamda oqimning aniq matematik tenglama orqali tavsiflanishini ta'minlaydi. Puazeyl qonuniga ko'ra, silindrik tomir bo'ylab oqayotgan suyuqlikning hajmiy oqim sarfi tomir radiusining to'rtinchi darajasi bilan proporsional bo'ladi, ya'ni radiusdagi kichik o'zgarishlar oqim hajmiga juda katta ta'sir ko'rsatadi. Shu sababli fiziologiyada arteriyalarning bir oz torayishi ham qon oqimini sezilarli darajada kamaytirishi mumkin, bu esa ateroskleroz, stenoz yoki spazm kabi klinik holatlarda qon ta'minoti buzilishining fizik asosini tashkil qiladi. Bundan tashqari, qonning yopishqoqligi ham oqim tezligiga bevosita ta'sir qiladi, chunki suyuqlik qanchalik yopishqoq bo'lsa, uning tomir bo'ylab siljishi uchun shunchalik katta bosim farqi talab etiladi.

Puazeyl qonuni qon aylanish tizimidagi bosim farqini va oqimni matematik tarzda ifodalab, yurak–tomir tizimining ishlashini chuqur tushunish imkonini beradi. Qon yurak tomonidan yaratilgan sistolik bosim tufayli arteriyalar bo'ylab oldinga harakatlanadi, tomirlar bo'ylab oqim davomida qarshilik oshgani sayin bosim kamayib boradi. Bu jarayonning fizik asosini Puazeyl qonuni orqali aniqlash mumkin, chunki qarshilik suyuqlikning yopishqoqligi va tomir radiusiga bog'liq bo'ladi. Arteriyalarning elastik xususiyatlari esa oqimning pulsatsion

xususiyatlarini tashkil etadi. Arteriya devorlari elastik moduli yuqori bo'lgan hollarda oqim laminar saqlanadi, biroq arterioskleroz natijasida elastiklik kamayganda oqim turbulensiyaga o'tishi mumkin. Turbulent oqim esa energiya sarfining ortishi, shovqin hosil bo'lishi va bosimning notekis taqsimlanishiga olib keladi.

Puazeyl qonuni mikrosirkulyatsiya tizimini o'rganishda ham juda muhimdir. Kapillyarlar radiusi juda kichik bo'lgani uchun hatto minimal torayishlar ham oqimni keskin kamaytiradi, bu esa to'qimalarning oksigenatsiya darajasiga, metabolism faoliyatiga va hujayra darajasidagi trofika jarayonlariga bevosita ta'sir ko'rsatadi. Shu sababli organizm kapillyarlarda qon oqimini avtonom nerv tizimi orqali juda nozik boshqaradi. Kapillyarlar darajasida qon oqimi, qonni qizil tanachalarining deformatsiya qobiliyati, plazma yopishqoqligi va tomir devorining endotelial qarshiligi Puazeyl modeli bilan bog'liq bo'lib, mikrosirkulyatsiyaning umumiy samaradorligini belgilaydi.

Organizm fiziologiyasida Puazeyl qonuni arteriyalar va venalarning o'zgaruvchan radiusi orqali oqimni qanday boshqarishini tushuntiradi. Arterial kengayish (vazodilatatsiya) oqimni oshiradi, torayish (vazokonstriksiyani) esa kamaytiradi. Bu jarayon metabolik regulyatsiya, miogen mexanizmlar va endotelial omillar bilan boshqariladi. Fiziologik sharoitda qon yopishqoqligi gematokrit darajasi, plazma oqsillarining miqdori, eritrotsitlarning agregatsiyalanish xususiyati va haroratga bog'liq bo'ladi. Puazeyl qonuni aynan shu yopishqoqlik parametrlarining oqimga ta'sirini matematik jihatdan ifodalaydi.

Yurak faoliyatini baholashda ham Puazeyl qonuni muhim ahamiyatga ega. Arterial tizimning umumiy periferik qarshiligi yurakning qancha kuch bilan qon haydashini belgilaydi. Qarshilik oshgan hollarda yurakning ishlashi murakkablashadi, sistolik bosim ko'tariladi va yurak mushaklariga tushadigan yuk ortadi. Ayni kategoriyalar gipertoniya, aorta stenozlari, periferik qon tomir kasalliklarining patofiziologiyasini tushunishda Puazeyl qonunining amaliy rolini ko'rsatadi.

Puazeyl qonuni suyuqliklar mexanikasining ideal modeli sifatida ba'zi cheklovlarga ega bo'lsa-da, fiziologik tizimlarda oqimning umumiy tendensiyalarini aniqlashda juda katta qiymatga ega. Tomirlar silindrik shaklda bo'lmazligi, oqim pulsatsion xarakterga ega bo'lishi va tomir devorlari elastik bo'lishiga qaramay, Puazeyl qonunidan foydalangan holda organizmdagi oqimlarning ko'plab parametrlarini taxminiy, ammo aniq ilmiy asosga ega bo'lgan tarzda baholash mumkin.

1.2.2. Qon bosimi va gidrodinamik modellar.

Qon bosimi va gidrodinamik modellar yurak–qon tomir tizimining funksional faoliyatini chuqur tahlil qilishda, arterial bosimning paydo bo'lish mexanizmlarini, tomirlar bo'ylab bosimning taqsimlanishini, periferik qarshilikning shakllanishini va gemodinamik oqimlarning fiziologik hamda patologik o'zgarishlarini izohlashda asosiy ilmiy platformani tashkil etadi. Qon bosimi yurakning ritmik qisqarishi natijasida hosil bo'ladigan gidrostatik va gidrodinamik kuchlarning aralash ta'siri bo'lib, u arteriyalardagi qonning harakatlanishini ta'minlash, to'qimalarga kislorod va oziq moddalarning yetkazilishi, metabolik mahsulotlarning chiqarilishi va umumiy fiziologik barqarorlikni saqlashda hal qiluvchi o'rin egallaydi. Qon bosimi darajasi yurak mushaklarining kuchi, tomir devorlarining tonusi, qonning yopishqoqligi, tomirlar lümenining diametri va periferik qarshilikning umumiy yig'indisi kabi omillarga bog'liq bo'lib, ushbu parametrlarni fizik modellar yordamida tahlil qilish gemodinamikani chuqur tushunish imkonini beradi.

Gidrodinamik modellar qon tomir tizimini murakkab, elastik naychalar tizimi sifatida ko'rib, suyuqliklar mexanikasi qonunlariga asoslanadi. Ideal holatda qon oqimi laminar xarakterga ega bo'lib, bu oqim Navye–Stoks tenglamalari, Puazeyl qonuni va Bernulli prinsiplari orqali tasvirlanadi. Qonning arteriya bo'ylab harakatida bosimning pasayishi, tezlikning oshishi yoki kamayishi tomirlarning

elastiklik xususiyatlari va ularning radiusi bilan chambarchas bog'liq bo'ladi. Arteriyalarning elastikligi tufayli qon oqimi pulsatsion xarakter kasb etadi: yurak sistolasi paytida arteriyalar kengayadi, diastola davrida esa ular elastik qaytuvchi kuch ta'sirida torayib, qonning uzluksiz oqimini ta'minlaydi. Bu hodisa Vindkessel modeli yordamida fizik tarzda izohlanadi. Vindkessel modelida arteriya elastik rezervuar sifatida qaralib, yurak urishlari oralig'ida ham oqimning davom etishi arteriyalar devorlarida saqlanadigan elastik energiya hisobiga ta'minlanadi.

Qon bosimining paydo bo'lishi yurakning nasos funksiyasiga asoslanadi. Sistolik fazada yurak chap qorinchasidagi qon kuchli bosim ostida aorta ichiga chiqariladi va bu jarayonda maksimal bosim (sistolik bosim) hosil bo'ladi. Diastola vaqtida esa aortaning elastik qaytish kuchi hisobiga qon oqimi davom etadi va minimal bosim (diastolik bosim) shakllanadi. Sistolik va diastolik bosim orasidagi farq puls bosimi deb ataladi va arteriyalarning elastik holati, yurakning zarb hajmi hamda tomir devorlarining umumiy qarshiligini baholashda muhim ko'rsatkich hisoblanadi.

Gidrodinamik modellar qonga tabiiy qon sifatida emas, balki yopishqoq suyuqlik sifatida qaraydi. Qon yopishqoqligi gematokrit darajasi, eritrotsitlarning deformatsiyalanuvchanligi, plazma oqsillarining kontsentratsiyasi va harorat kabi omillarga bog'liq bo'lib, ushbu parametrlar qon oqimiga sezilarli ta'sir ko'rsatadi. Qon yopishqoqligi oshgan hollarda periferik qarshilik ko'tariladi, bu esa arterial bosimning ortishiga, yurakning ortiqcha yuklanishiga va to'qimalarga yetkaziladigan qon miqdorining kamayishiga sabab bo'ladi. Aksincha, yopishqoqlik kamayganda oqim tezligi ortadi, lekin kislorod tashish qobiliyati pasayishi mumkin.

Qon tomirlarining radiusi gidrodinamikaning eng muhim parametrlaridan biri bo'lib, uning kichik o'zgarishi ham oqimga keskin ta'sir qiladi. Puazeyl qonuniga ko'ra, radiusning to'rtinchi darajasi oqim sarfini belgilaydi. Shunday qilib, arteriyaning 50 foizga torayishi oqimni deyarli 16 barobar kamaytiradi. Bu

fiziologik jarayonlar uchun ham, patologik holatlar uchun ham muhim ahamiyatga ega. Ateroskleroz, stenoz, spazm va tromboz kabi kasalliklar aynan radiusning fiziologik chegaralardan chetga chiqishi natijasida oqimga bo'lgan keskin ta'sirni keltirib chiqaradi.

Qon bosimi va gidrodinamikaning yana bir muhim jihatida turbulent oqimning paydo bo'lishidir. Laminar oqim tartibli va qatlamli xarakterga ega bo'lsa, turbulent oqim notekis, girdobli va energiya yo'qotishlari yuqori bo'lgan murakkab oqimdir. Reynolds soni orqali turbulent oqim paydo bo'lishi ehtimoli aniqlanadi. Reynolds soni oshgan hollarda, masalan, yuqori bosim pasayishlari, keskin toraygan arteriyalar yoki juda yuqori oqim tezligi kuzatilganda turbulent oqim yuzaga keladi. Bu holat auskultatsiya paytida fiziologik shovqinlar (masalan, arterial shovqinlar yoki yurak shovqinlari) sifatida eshitilishi mumkin.

Gidrodinamik modellar yurak–tomir tizimini matematik jihatdan ifodalashda ham keng qo'llaniladi. Yurakning zarb hajmi, yurak minut hajmi, umumiy periferik qarshilik, arterial elastiklik koeffitsienti va qon bosimining vaqt bo'yicha o'zgarishini tavsiflovchi tenglamalar yordamida normal va patologik gemodinamik holatlarni prognoz qilish, yurak yetishmovchiligi, gipertoniya, aorta stenozlari, travmatik shok va boshqa kasalliklarning rivojlanish mexanizmlarini o'rganish mumkin. Zamonaviy biotibbiyot muhandisligida bu modellar kompyuter simulyatsiyalari, raqamli gemodinamika (CFD), virtual fiziologik odam platformalari va matematik modellashtirish tizimlari orqali yanada takomillashgan ko'rinishda qo'llaniladi.

Shu tariqa, qon bosimi va gidrodinamik modellar tibbiy fiziologiyani chuqur anglash, klinik tashxisni aniq qo'yish, yurak–tomir tizimi kasalliklarini erta aniqlash va muhandislik texnologiyalarini rivojlantirishda fundamental ilmiy poydevor sifatida e'tirof etiladi. Qon oqimi va bosimning fizik tabiatini chuqur tahlil qilish, nafaqat nazariy asos, balki amaliy klinik qarorlar qabul qilish uchun ham juda muhimdir.

1.2.3. Tana to'qimalarida issiqlik almashinuvi (Furye qonuni).

Inson organizmidagi issiqlik almashinuvi jarayoni tirik to'qimalarning fiziologik barqarorligini, metabolik jarayonlarning optimal tezligini, fermentativ reaksiyalarning muvozanatini hamda hujayralar hayotiy faoliyatining uzluksiz davom etishini ta'minlaydigan asosiy fizik mexanizmlardan biri bo'lib, u issiqlikning to'qimalar bo'ylab taqsimlanishi, tashilishi va yo'qotilishi bilan bog'liq murakkab jarayonlar majmuasiga asoslanadi. Termoregulyatsiya jarayonida organizm doimo issiqlik ishlab chiqaradi va uni tashqi muhit bilan almashadi, bu esa issiqlikni o'tkazish, konveksiya, radiatsiya va evaporatsiya kabi bir nechta mexanizmlar orqali amalga oshadi. Tana to'qimalarida issiqlikning qanday tarqalishini fizik nuqtai nazardan izohlashda esa Furye qonuni asosiy nazariy platformani tashkil qiladi. Ushbu qonun issiqlik oqimining miqdori, yo'nalishi va intensivligi to'qimalarning issiqlik o'tkazuvchanligi va harorat gradientiga bog'liq ekanligini matematik tarzda ifodalaydi.

Furye qonuniga ko'ra, issiqlik oqimi har doim harorat yuqori bo'lgan sohadan past haroratli sohaga qarab yo'naladi, ya'ni issiqlik har doim harorat gradiyenti bo'yicha tarqaladi. Bu jarayon to'qimalarning ichki mikrostrukturasiga, suv miqdoriga, hujayra zichligiga, oqsillar, yog'lar va ionlarning tarkibiga bog'liq holda turlicha kechadi. Masalan, mushak to'qimalari issiqlikni yaxshi o'tkazadi, chunki ularda suvning miqdori yuqori, kapillyarlar zich va metabolik faoliyat kuchlidir. Yog' to'qimalari esa past issiqlik o'tkazuvchanlikka ega bo'lib, ular issiqlikni yomon o'tkazadi va bu xususiyat organizmning tabiiy issiqlik izolatsiyasini ta'minlaydi. Shu bois termoregulyatsiya jarayonida yog' qatlami sovuq muhitda organizmni issiqlik yo'qotishdan himoya qiluvchi tabiiy izolyator vazifasini bajaradi.

Tana ichki organlarida issiqlik almashinuvi qon oqimi bilan ham chambarchas bog'liqdir, chunki qon harakat qilish jarayonida issiqlik tashuvchi sifatida ishtirok etadi va metabolik issiqlikni periferik to'qimalardan markazga yoki markazdan

periferiyaga tashiydi. Qon oqimi kuchli bo'lgan hududlarda issiqlik tezroq tarqaladi, qon ta'minoti sust hududlarda esa issiqlik tarqalish jarayoni sekin kechadi. Bu jarayonlarning barchasi Furiye qonuni bilan bog'liq bo'lib, harorat gradienti va to'qimaning issiqlik o'tkazuvchanligi orqali matematik tarzda ifodalanadi. Aynan shu mexanizm sovuq muhitga tushganda teri osti tomirlarining torayishi va markaziy organlarga ko'proq qon yo'naltirilishiga sabab bo'ladi, chunki organizm markaziy organlar haroratini barqaror ushlab turishga intiladi.

Tibbiy texnologiyalarda issiqlik almashinuvi jarayonini chuqur tushunish juda muhim bo'lib, bu jarayon ko'plab diagnostik va terapevtik usullarning ilmiy asosini tashkil qiladi. Masalan, termografiyada to'qimalarning nurlanish xususiyatlari infraqizil diapazonda qayd etiladi va bu jarayon to'qimalarning harorat taqsimotiga bog'liq ravishda o'zgaradi. Yallig'lanish o'choqlarida metabolizmning oshishi tufayli issiqlik ishlab chiqarish kuchayadi va Furiye qonuniga muvofiq issiqlik oqimi ko'payadi, bu esa termografik tasvirlarda aniq ko'rinadi. Shuningdek, issiqlik o'tkazuvchanlik jarayoni lazer terapiyasi, radiochastotali ablatsiya, gipertermiya terapiyasi, krioterapiyada muhim rol o'ynaydi, chunki ushbu usullarda to'qimalarning belgilangan hududida issiqlik energiyasini oshirish yoki kamaytirish orqali patologik hujayralarni zararlash mexanizmi qo'llaniladi.

Furiye qonuni tana to'qimalarining zararli issiqlik ta'siriga qanday javob berishini tushunishda ham asosiy nazariy model hisoblanadi. Masalan, kuyishlarda issiqlikning yuqori darajada va qisqa vaqt ichida teri qatlamlari bo'ylab tarqalishi to'qima strukturalarining jiddiy buzilishiga olib keladi. Aksincha, krioterapiyada ekstremal sovuq ta'siri natijasida hujayralardagi suv muzlaydi, muz kristallari hujayra membranasini yemirib, to'qima nekroziga sabab bo'ladi. Ushbu jarayonlarda issiqlik oqimi Furiye qonuni orqali matematik tarzda modellashtiriladi, shuning uchun krioterapiya protokollarini belgilashda to'qimalarning issiqlik

o'tkazuvchanligi, issiqlik sig'imi, muzlash nuqtasi va suv miqdori kabi fizik parametrlar hisobga olinadi.

Furye qonuni termik xavfsizlikni ta'minlashda ham muhim rol o'ynaydi. Masalan, fizik jarayonlarni modellashtirish orqali uzoq davom etadigan jarrohlik operatsiyalari vaqtida to'qimalarning haddan tashqari qizib ketishi yoki sovishi oldini olish mumkin. Elektrokoagulyatsiya va elektrokauterizatsiya kabi usullarda ishlatiladigan yuqori chastotali toklar to'qimaga issiqlik energiyasini uzatadi va bu issiqlikning qanday tarqalishini nazorat qilish jarayonning xavfsizligi uchun hal qiluvchi ahamiyatga ega. Shu bois termik modellar klinik amaliyotda keng qo'llanilib, issiqlik ta'sirini to'g'ri baholash uchun Furye tenglamalari asosida tuziladi.

Shu tariqa, tana to'qimalarida issiqlik almashinuvi Furye qonuniga tayanadi va bu qonun biologik tizimlarda issiqlikning qayerga, qanday tezlikda va qanday miqdorda tarqalishini ilmiy jihatdan aniq tahlil qilish imkonini beradi. Issiqlik almashinuvi fiziologiya, patofiziologiya, tibbiy texnologiyalar, jarrohlik, diagnostika va rehabilitatsiya jarayonlarida o'ta muhim o'ringa ega bo'lib, uning chuqur o'rganilishi biotibbiyot muhandisligi uchun fundamental ahamiyat kasb etadi.

1.3. To'qimalarning elektromagnit xususiyatlari.

Tana to'qimalarining elektromagnit xususiyatlari biotibbiyot muhandisligi, tibbiy diagnostika, terapevtik texnologiyalar va biofizik tadqiqotlarning poydevorini tashkil etuvchi eng murakkab va fanlararo yo'nalishlardan biri bo'lib, ushbu xususiyatlar tirik organizmdagi molekulalar, hujayralar, to'qimalar va organlarning elektromagnit maydonlarga bo'lgan javobini fizika qonunlari asosida tushuntiradi. Tirik to'qimalar elektromagnit maydon bilan o'zaro ta'sirlashar ekan, bu jarayonlar dielektrik xususiyatlar, elektr o'tkazuvchanlik, ionlarning harakati, dipollarning orientatsiyasi, membrana potentsiallari, elektromagnit energiyaning yutilishi, issiqlikka aylanishi va biologik strukturalarning rezonans javobi kabi

ko'plab fizik parametrlarga bog'liq bo'ladi. Shu sababli to'qimalarning elektromagnit xususiyatlarini chuqur o'rganish tibbiy tasvirlash tizimlari, fiziologik monitoring apparatlari, radiochastotali va lazer terapiyalar, neyrostimulyatsiya va boshqa ko'plab yuqori texnologiyali tibbiy usullarning ilmiy platformasini shakllantiradi.

Tirik to'qimalarning elektromagnit maydonga nisbatan elektr o'tkazuvchanligi ionlarning harakatlanish qobiliyatiga, hujayra ichi va tashqarisidagi elektrolit eritmalarning tarkibiga, suvning miqdoriga, oqsillar, lipidlar va nuklein kislotalarning konsentratsiyasiga bog'liq bo'ladi. Masalan, qon va mushak to'qimalari yuqori o'tkazuvchanlikka ega, chunki ularda suv miqdori ko'p va ionlarning zichligi yuqori. Aksincha, yog' to'qimalari va suyaklar past elektr o'tkazuvchanlikka ega, chunki ularda suv kam, ionlar miqdori past va dielektrik ko'rsatkichlar yuqori bo'ladi. Ushbu xususiyatlar tibbiy diagnostikada – masalan, bioimpedans tahlilida, elektroimpedans tomografiyada, fiziologik parametrlarni o'lchash apparatlarida keng hisobga olinadi.

To'qimalarning elektromagnit xususiyatlarini belgilovchi yana bir muhim parametr dielektrik penetratsiya bo'lib, u elektromagnit to'lqinlarning to'qimalar ichiga qanchalik chuqur kirib borishini ko'rsatadi. Dielektrik xususiyat yurak, miya, mushaklar, o'pka, jigar kabi organlarda turlicha bo'lib, bu farqlar to'qimalarning ion tarkibi, suv miqdori, molekulyar polarizatsiya xususiyatlari bilan belgilanadi. Yuqori chastotalarda dielektrik yo'qotishlar ortadi, chunki molekulalarning dipol momentlari tez-tez qayta yo'nalishi kerak bo'ladi. Bu jarayon ayniqsa radiochastotali ablyatsiya, diatermiya va mikroto'lqinli terapiyada muhim o'rin tutadi. Elektromagnit energiyaning to'qima tomonidan yutilishi natijasida issiqlik hosil bo'ladi va bu jarayon o'z navbatida issiqlik o'tkazuvchanligi va Furiye qonuni bilan izohlanadigan issiqlik almashinuvi bilan bog'lanadi.

To'qimalarning elektromagnit maydonga javob berishida membrana potentsiali alohida ahamiyatga ega. Hujayra membranasini o'ziga xos dielektrik qatlam bo'lib,

ichki va tashqi muhit o'rtasidagi elektr potensiallar farqi ionlarning notekis taqsimlanishi natijasida yuzaga keladi. Elektromagnit maydon hujayra membranasidagi ion kanallarini faollashtirishi, depolyarizatsiya jarayonini boshlab berishi yoki to'qimalarda elektr uyg'onishni keltirib chiqarishi mumkin. Shu sababli yurak mushaklari va neyronlar elektromagnit maydonlarga sezgir hisoblanadi. Bu xususiyat elektroimpuls terapiyasi, elektrokardistimulyatsiya, transkraniyal magnit stimulyatsiya (TMS) kabi tibbiy texnologiyalarda qo'llaniladi. Elektromagnit energiyaning yutilish darajasi (SAR – Specific Absorption Rate) to'qimalarning elektromagnit maydon bilan o'zaro ta'sirlashuvi natijasida qancha energiya issiqlikka aylanishini ko'rsatadi. Bu parametr mobil aloqa qurilmalari, radiochastotali terapiyalar, MRI apparatlarida xavfsizlik uchun majburiy nazorat qilinadi. Tana to'qimalarining SAR qiymati suv miqdori, zichlik, elektrolit tarkibi va elektromagnit to'lqinning chastotasiga bog'liq bo'ladi. Masalan, yuqori suv tarkibiga ega to'qimalar (qon, mushak) elektromagnit energiyani ko'proq yutadi, yog' to'qimalari esa kamroq yutadi.

Elektromagnit to'lqinlarning to'qimalar orqali o'tishi, yutilishi va sochilishi optik fizikadagi jarayonlarga ham o'xshaydi, ammo bu jarayonlar biologik tuzilmalarning murakkab elektroximik tarkibi bilan cheklanadi. Masalan, mikroto'lqinli tasvirlash tizimlarida elektromagnit to'lqinlarning to'qimalarda tarqalishi differensial dielektrik farqlar orqali tasvir hosil qiladi. Shuningdek, elektroimpedans tomografiyada to'qimalarning o'tkazuvchanligi o'zgarishi orqali ichki organlarning funktsional holati aniqlanadi. MRI texnologiyasida esa elektromagnit maydon yadrolarning spin dinamikasiga ta'sir ko'rsatadi va bu kvant fizikasi asosida izohlanadi.

Elektromagnit xususiyatlar xavfsizlik talablari uchun ham juda muhimdir. Masalan, MRT apparatlarida kuchli magnit maydonlar metall implantlar, yurak stimulyatorlari yoki ferromagnit jismlarni o'ziga tortib, xavf tug'dirishi mumkin. Radiochastotali energiya esa haddan tashqari yutilganda to'qimalarda issiqlik

shikastlanishlariga olib kelishi ehtimoli mavjud. Shu sababli elektromagnit texnologiyalarni qo'llashda to'qimalarning dielektrik xususiyatlari, o'tkazuvchanlik darajasi, issiqlik sig'imi, qizish tezligi kabi parametrlarga asoslangan modeli hisobga olinadi.

To'qimalarning elektromagnit xususiyatlarini o'rganish biologik tizimlarning molekulyar strukturasi, makroskopik funksiyalarini va klinik ahamiyatga ega jarayonlarini chuqur tahlil qilish imkonini beradigan fundamental yo'nalish bo'lib, u zamonaviy diagnostika, terapiya, neyromuhandislik va reabilitatsiya texnologiyalarining asosiy ilmiy poydevoridir.

1.3.1. Dielektrik xususiyatlar. Bioimpedans. Elektrofiziologiya.

Tirik to'qimalarning dielektrik xususiyatlari, bioimpedans xatti-harakati va elektrofiziologik jarayonlari tibbiy fizikaning eng muhim yo'nalishlaridan biri bo'lib, ular organizmning elektromagnit maydonga bo'lgan reaksiyasini, elektr o'tkazuvchanlik xususiyatlarini, hujayra membranalari orqali ionlarning harakat mexanizmini hamda bioelektrik signallar hosil bo'lishining fizik asoslarini tushuntiradi. Bu uch konsept bir-biri bilan uzviy bog'liq bo'lib, to'qimalarning struktura, tarkib va fiziologik holatiga qarab o'zgarib turadi. Shuning uchun ularni chuqur o'rganish diagnostika, monitoring, funksional tahlil, signal o'lchash, terapevtik stimulyatsiya va tibbiy tasvirlash tizimlarining ilmiy platformasini shakllantiradi.

To'qimalarning dielektrik xususiyatlari

Tirik to'qimalar dielektrik modda sifatida elektromagnit maydon bilan o'zaro ta'sirlashadi, chunki ular suv, ionlar, oqsillar, lipidlar, uglevodlar va boshqa polimer strukturalardan tashkil topgan murakkab elektrokimyoviy muhitdir. To'qimaning dielektrik xususiyati uning elektr maydonni qanchalik o'tkazishi yoki to'siqligi, energiyani qanchalik yutishi, dipol molekulalarning maydonga qanday

javob berishi va elektromagnit to'qlinlarning tarqalish tezligiga bog'liq ko'rsatkich sifatida qaraladi.

Dielektrik xususiyatlar quyidagi asosiy parametrlar bilan belgilanadi:

1. **Dielektrik doimiylik** – to'qimaning elektr maydonni saqlash yoki energiyani polarizatsiya shaklida yig'ish qobiliyati. Suv miqdori yuqori bo'lgan to'qimalarda (qon, mushak, jigar) dielektrik doimiylik juda yuqori bo'ladi.
2. **Dielektrik yo'qotishlar** – elektromagnit energiya to'qimaga kirgach issiqlikka aylanishi. Bu radiochastota terapiyasi, mikroto'qlinli ablyatsiya, diatermiya kabi usullarda klinik jihatdan muhim.
3. **O'tkazuvchanlik** – elektr zaryadining ionlar orqali harakatlanish qobiliyati.

Elektrolitlar va suvga boy to'qimalar yuqori o'tkazuvchanlikka ega.

To'qimalarning dielektrik xulqi chastotaga bog'liq bo'lib, past chastotalarda ionlarning o'zgaruvchan maydonga javob berishi ustun bo'ladi, yuqori chastotalarda esa dipol molekulalarning tez yo'nalish almashinuvi kuzatiladi. Aynan shuning uchun mikroto'qlinli, radiochastotali va optik diapazonlarda to'qimalarning elektromagnit maydonga bo'lgan reaksiyasi keskin farqlanadi.

Dielektrik xususiyatlarning o'zgarishi patologik jarayonlar haqida muhim ma'lumotlar beradi. Masalan, o'smalar, nekroz, yallig'lanish, shishlar kabi o'zgarishlarda suv miqdori, ionlar tarkibi va hujayra membranasining strukturasi farqlar kuzatiladi, bu esa elektromagnit o'lchovlarda aniq namoyon bo'ladi.

Bioimpedans va uning fiziologik asoslari

Bioimpedans – to'qimalarning o'zgaruvchan elektr maydoniga qarshiligi bo'lib, uning qiymati rezistiv va reaktiv komponentlardan tashkil topadi. Rezistiv komponent ionlarning erkin harakati bilan bog'liq o'tkazuvchanlikni belgilaydi, reaktiv komponent esa hujayra membranalari, suyuqliklar, oqsillar va to'qimaning dielektrik xossalari bilan bog'liq kapasitans xulqini ifodalaydi.

Bioimpedansning fiziologik asoslari quyidagilarga tayanadi:

1. **Hujayra membranasi kondensator sifatida ishlaydi**, chunki u lipid ikkiqatlamdan tashkil topgan va ionlarga nisbatan katta qarshilik ko'rsatadi.
2. **Hujayralararo suyuqlik va hujayra ichi suyuqligi yaxshi o'tkazuvchidir**, chunki ularda elektrolitlar mavjud.
3. **Past chastotalarda tok asosan hujayralar atrofi orqali o'tadi**, chunki membrana kapasitivi tokning hujayra ichiga kirishiga to'sqinlik qiladi.
4. **Yuqori chastotalarda tok hujayra ichiga ham kiradi**, chunki membrana kapasitivi kamayadi.

Bioimpedans tibbiyotda juda ko'p yo'nalishlarda qo'llaniladi:

- **Tanadagi suv miqdorini o'lchash**
- **Muskul va yog' to'qimalari nisbatini aniqlash**
- **O'pka ventilyatsiyasini monitoring qilish**
- **Yurak minut hajmini baholash (impedans kardiografiyasi)**
- **Nekroz, yallig'lanish va shishlarni aniqlash**
- **Elektroimpedans tomografiya orqali tasvirlash**

Bioimpedansning qiymati to'qimaning biologik holatiga juda sezgir bo'lib, uning o'zgarishi fiziologik jarayonlarni real vaqt rejimida baholash imkonini beradi.

Elektrofiziologiya va bioelektrik jarayonlar

Elektrofiziologiya tirik to'qimalarning elektr jarayonlarini o'rganadi va uning markazida ion kanallari, membrana potentsiali, depolyarizatsiya, repolyarizatsiya, ion oqimlari va hujayralarning qo'zg'aluvchanlik xususiyatlari yotadi. Tirik organizmning barcha faol tizimlari – yurak, miya, mushaklar, bezlar – elektr hodisalar orqali boshqariladi.

Elektrofiziologik jarayonlarning fizik asoslari quyidagilar:

1. **Hujayra membranasining ichki va tashqi muhit o'rtasidagi ion disbalansi tufayli potentsiallar farqi hosil bo'ladi.**
2. **Membrana bo'ylab ion kanallarining ochilib-yopilishi natijasida ion oqimi yuzaga keladi.**

3. **Elektr impulslarining tarqalishi kabel nazariyasiga asoslanadi.**
4. **Aksiyal toklar va konsentratsiya gradientlari tarqalish tezligini belgilaydi.**

Elektrofiziologiya asosida yaratilgan klinik usullar:

- **Elektrokardiografiya (EKG)** – yurak mushaklarining elektr faolligini aks ettiradi.
- **Elektroensefalografiya (EEG)** – miya neyronlarining sinxron elektr impulslarini o'lchaydi.
- **Elektromiografiya (EMG)** – skelet mushaklarining elektr javobini qayd etadi.
- **Nevrostimulyatsiya texnologiyalari** – past va yuqori chastotali toklar orqali nervni faollashtiradi.
- **Kardiostimulyatorlar** – yurakning elektr impulslari yetishmaydigan hollarda ritmni saqlaydi.

Elektrofiziologiya bioimpedans va dielektrik xususiyatlar bilan bevosita bog'liq bo'lib, hujayralarning elektr xatti-harakati elektromagnit maydonlarga javob mexanizmlarini to'liq tushunish uchun asos yaratadi.

Dielektrik xususiyatlar, bioimpedans va elektrofiziologik jarayonlarning o'zaro uyg'unligi tirik to'qimalarning elektromagnit maydonga javobini aniqlovchi asosiy fizik platforma bo'lib, bu uch yo'nalishning integratsiyalashgan o'rganilishi zamonaviy tibbiy diagnostika, monitoring, terapevtik stimulyatsiya va tasvirlash tizimlarining rivojlanishiga asos bo'ladi. Tibbiy texnologiyalarning aksariyati aynan shu tamoyillarga asoslanib yaratilgan va kelajakdagi innovatsion qurilmalar ham shu qonuniyatlar asosida shakllanishi muqarrar.

1.4. Tibbiy diagnostikaning fizik modellari.

Tibbiy diagnostikaning fizik modellari zamonaviy klinik tibbiyotning ilmiy asosi bo'lib, turli diagnostik qurilmalar va usullar qanday ishlashini, biologik

ob'ektlarning fizik xususiyatlari o'lchov natijalariga qanday ta'sir ko'rsatishini, turli energiya turlari to'qimalar bilan qanday o'zaro ta'sirlashishini chuqur tushuntiradi. Inson organizmini fizik tamoyillar asosida o'rganish — tibbiy tasvirlash, signallarni qayd etish, o'lchash, tahlil qilish va modellashtirish jarayonlarining to'liq ilmiy poydevorini shakllantiradi. Tibbiy diagnostika tizimlarining ishlash mexanizmini matematik modellar orqali ifodalash esa ma'lumot olish jarayonini aniq, qaytariluvchan va ishonchli qiladi. Shu sababli fizik modellarsiz na biror diagnostik qurilma to'liq ishlashi mumkin, na zamonaviy tibbiyotning texnologik taraqqiyoti davom etadi.

Tibbiy diagnostikada qo'llaniladigan fizik modellarning asosiy tamoyili shundan iboratki, tirik to'qimalar ma'lum turdagi fizik energiyani o'ziga xos tarzda yutadi, qaytaradi, aks ettiradi, sochadi yoki o'tkazadi va ushbu o'zaro ta'sir natijasida o'lchash mumkin bo'lgan fizik signal shakllanadi. Keyinchalik ushbu signalni matematik tahlil va raqamli qayta ishlash orqali funksional, morfologik yoki molekulyar ma'lumotlarga aylantirish imkoniyati tug'iladi.

Tibbiy diagnostikaning eng muhim fizik modellari qatoriga elektromagnit to'liqlar modellariga asoslangan rentgenografiya, kompyuter tomografiyasi, magnit-rezonans tomografiya, optik koherent tomografiya; akustik modellar asosida ishlovchi ultratovush diagnostikasi; elektr-impedans modellar asosidagi elektroimpedans tomografiya; radiochastotali va mikroto'liqlik modellar asosidagi termo-radiatsion diagnostika; elektr signallar modellariga asoslangan elektrofiziologik tizimlar kiradi.

Rentgen nurlari bilan diagnostika elektromagnit to'liqlarning modellariga asoslanib, to'qimalarning rentgen nurlarini turlicha yutishi fotoelektr effekt, Kompton sochilishi va yutilish koeffitsientlari bilan izohlanadi. Rentgen nurlarining energiyasi to'qimalarning atom raqamiga, zichligiga, elektronlar soniga bog'liq bo'lib, suyaklar yuqori yutilishga ega, yumshoq to'qimalar esa past yutiladi. Natijada foydali kontrast hosil bo'lib, tasvir shakllanadi. Kompyuter

tomografiya ushbu tamoyilning rivojlangan matematik modeli bo'lib, ko'plab proeksiyalarni kompyuter orqali qayta tiklash jarayoni Radon transformatsiyasi, filtrlangan qayta proeksiya algoritmlari va statistik rekonstruksiya modellariga asoslanadi.

Magnit-rezonans tomografiya kvant fizikasi va elektromagnit rezonans modellari asosida yaratilgan bo'lib, u yadro spinlarining magnit maydonga nisbatan orientatsiyasi, radiochastotali impulslarni yutishi va relaksatsiya vaqtida energiyani qayta chiqarishi tamoyillariga asoslanadi. Ushbu jarayonlarda Larmor chastotasi, spin–relyaksatsiya jarayonlari va magnit momentlarning fazoviy dinamikasi asosiy matematika va fizika modellarini shakllantiradi. Bu texnologiya yuqori aniqlikda yumshoq to'qimalar tasvirini olish imkonini beradi, chunki har bir to'qimaning relaksatsiya vaqti turlicha bo'ladi.

Ultratovush diagnostikasi akustik fizikaga asoslanadi, unda yuqori chastotali mexanik to'lqinlar to'qimalar chegaralarida akslanib, qabul qiluvchi sensorlar orqali qayd etiladi. To'lqinlarning akslanish darajasi to'qimalarning zichligi, elastikligi, akustik impedansi kabi parametrlarga bog'liq bo'lib, bu jarayonlarni matematik tarzda Helmholtz tenglamalari va to'lqin tenglamalari orqali ifodalash mumkin. Doppler ultratovushida esa oqayotgan qonning to'lqin manbaiga nisbatan tezligi akustik Doppler siljishi orqali aniqlanadi, bu esa qon oqimining tezligi va yo'nalishini matematik ravishda aniqlash imkonini beradi.

Elektroimpedans tomografiya to'qimalarning o'zgaruvchan tok ostidagi o'tkazuvchanligi va dielektrik xususiyatlariga asoslanadi. Bu texnologiyada tananing turli nuqtalariga juda kichik o'zgaruvchan tok yuborilib, boshqa nuqtalardagi potentsiallar o'lchanadi. Elektr signallarining tana ichida tarqalishi Laplas tenglamalari orqali tavsiflanadi. Ushbu ma'lumotlar asosida to'qimaning lokal o'tkazuvchanlik xaritasi qayta tiklanadi. Bu model o'pka ventilyatsiyasi, qonning to'planishi, shishlar yoki yallig'lanish jarayonlarini aniqlashda qo'llaniladi.

Elektrofiziologik diagnostika tizimlari – elektrokardiografiya, elektroensefalografiya, elektromiografiya – elektr maydonlarining organizmda tarqalishini kabel modeli, hajm o'tkazuvchanlik modeli va bioelektrik dipol modeli asosida analiz qiladi. Masalan, yurakning elektr faolligini dipol modeli orqali tasvirlash mumkin, bunda yurakning elektr vektori tananing turli nuqtalarida potentsiallar farqini hosil qiladi va bu farqlar elektrodlarda qayd etiladi. Miyada esa neyronlarning postsinaptik potentsiallari fazoviy sinxronlashuv natijasida EEG signalini hosil qiladi, bu jarayonni matematik modellashtirish Maxwell tenglamalari va kabel nazariyasi orqali amalga oshiriladi.

Optik diagnostika modellarida yorug'likning to'qimalarda sochilishi va yutilishi Mie nazariyasi, Reyli sochilishi, Beer–Lambert qonuni orqali izohlanadi. Ushbu modellar qon kislorodlanishini o'lchaydigan pulsoksimetriya, optik biosensorlar, koherent tomografiya kabi texnologiyalarning asosini tashkil qiladi. Optik energiyaning sochilish darajasi to'qimalardagi xromofor molekulalari (gemoglobin, melanindan iborat pigmentlar)ning yutilish spektriga bog'liq bo'ladi. Termik diagnostika modellari issiqlik nurlanishi, konveksiya va diffuzion issiqlik almashinuviga asoslanadi. Infraqizil termografiya tana yuzasidan chiqayotgan issiqlik nurlanishini Stefan–Boltsman qonuni orqali tahlil qiladi. Gipertermiya yoki krioterapiya modellari esa issiqlikning to'qimalarda tarqalishini Furiye tenglamasi orqali hisoblaydi.

Tibbiy diagnostikaning fizik modellari klinik amaliyotda keng qo'llaniladigan barcha texnologiyalarning ilmiy asosini tashkil etadi. Ushbu modellar yordamida tasvirlar aniq, fiziologik jarayonlar to'g'ri talqin qilinadi, patologiya erta bosqichda aniqlanadi, tibbiy qurilmalarning xavfsizligi va samaradorligi ta'minlanadi. Tibbiyot texnologiyalari rivojlanar ekan, fizik modellar ham yanada murakkablashib, ko'p parametrlı statistik modellar, differensial tenglamalar asosidagi tizimlar, kompyuter simulyatsiyalari va sun'iy intellekt bilan birlashtirilgan diagnostik algoritmlar orqali takomillashmoqda.

1.4.1. Optik diagnostika.

Optik diagnostika tirik to'qimalarning yorug'lik bilan o'zaro ta'siriga asoslangan bo'lib, zamonaviy tibbiyotda keng qo'llaniladigan, yuqori aniqlikka ega, invaziv bo'lmagan va ko'pincha real vaqt rejimida ishlaydigan diagnostik texnologiyalar majmuasini tashkil qiladi. Optik usullar yorug'likning yutilishi, aks ettirilishi, singishi, sochilishi yoki interferensiyalashuvi kabi fundamental fizik hodisalarga asoslanadi. Bu tamoyillar biologik to'qimalarning molekulyar tuzilishi, optik zichligi, pigment tarkibi, qon aylanish darajasi va hujayraviy strukturalari haqida chuqur ma'lumot olish imkonini beradi. Optik diagnostikaning afzalligi shundaki, u elektromagnit spektrning turli qismlaridan – ultrabinafsha, ko'rinadigan yorug'lik, yaqin infraqizil, uzoq infraqizil diapazonlardan foydalanishi mumkin. Har bir diapazon to'qimalar bilan turlicha o'zaro ta'sirlashadi va shu bois ma'lum fiziologik yoki patologik jarayonlarni o'rganishda o'ziga xos imkoniyat yaratadi.

Optik diagnostikaning ilmiy poydevori biologik to'qimalarning optik xususiyatlarini o'rganadigan biooptika va fotonika tamoyillariga asoslanadi. Yong'in nuqtasi to'qimalarda yorug'likning sochilishi va yutilishidir. To'qimalardagi xromoforlar – gemoglobin, melanin, suyuqliklar, suv molekullari va oqsillar – yorug'likning muayyan to'lqin uzunliklarida yutilishiga sabab bo'ladi. Bu jarayon Beer–Lambert qonuni bilan tavsiflanadi, ya'ni yutilish darajasi yorug'lik yo'lining uzunligi va yutilish koeffitsientiga mutanosib bo'ladi. Shu sababli optik diagnostika yordamida qonning kislorod bilan to'yinganligini, perfuziyasini, to'qimalardagi o'zgarishlarni aniq o'lchash mumkin. Masalan, pulsoksimetriya aynan shu qonuniyatga tayanib ishlaydi, unda qizil va infraqizil yorug'lik o'tkazilganda gemoglobinning yutilish spektri asosida arterial kislorod to'yinganligi aniqlanadi.

Optik diagnostikaning muhim yo'nalishlaridan biri optik koherent tomografiya bo'lib, interferensiya tamoyillariga asoslanadi. Ushbu texnologiyada yaqin

infraqizil yorug'lik nurlari to'qima ichiga yuboriladi va akslangan nurlar referensiya nuri bilan interferensiyalashgan holda qayta tiklanadi. Bunda interferensiya naqshlari asosida to'qimaning mikrostrukturasini mikrometr aniqlikda uch o'lchamli tasvirlash imkoniyati yaratiladi. Optik koherent tomografiya oftalmologiyada retina qatlamlarini xaritalash, kardiologiyada tomir devorlari tarkibini baholash, dermatologiyada terining mikroyuza o'zgarishlarini aniqlashda keng qo'llaniladi. Interferensiya hodisasining sezgirligi juda yuqori bo'lgani uchun signal shovqini kam bo'ladi va tasvirning aniqligi klinik diagnostikada katta ustunlik beradi.

Spektroskopiya optik diagnostikaning yana bir asosiy yo'nalishi bo'lib, yorug'likning to'qimalarda yutilish spektrini o'lchash orqali molekulyar tarkib haqida ma'lumot beradi. Qizil va infraqizil spektrlarda spektroskopiya yordamida qonning oksigenatsiyasi, glyukoza darajasi, suvning miqdori, to'qimalarning metabolik faolligi haqida ma'lumot olish mumkin. Masalan, yaqin infraqizil spektroskopiya qon miqdori va oksigenatsiyani invaziv bo'lmagan holda aniqlash imkonini beradi. Raman spektroskopiyasi esa lazer nurlari bilan molekulalarning vibratsion holatini o'lchab, to'qimalarda kimyoviy o'zgarishlarni aniqlashga imkon yaratadi.

Optik diagnostikada yorug'likning sochilishi ham muhim ahamiyatga ega. Tirik to'qimalarda yorug'likning sochilishi murakkab bo'lib, Mie va Reyli nazariyalari orqali izohlanadi. Katta zarracha radiusiga ega strukturalar Mie sochilishi, kichik molekulalar esa Reyli sochilishini yuzaga keltiradi. Bu jarayonlarni hisobga olish optik tasvir sifatini oshirishda, ayniqsa teri, o'pka, mushak va boshqa notekis strukturalarda muhimdir. Biotibbiyotda diffuz reflektansning o'lchovi teri kasalliklarini aniqlash, pigmentatsiya darajalarini o'rganish, kuyish chuqurligini baholash kabi jarayonlarda qo'llaniladi.

Fluorestscent diagnostika ham optik usullar doirasiga kirib, u yorug'likning molekulalar tomonidan yutilishi va boshqa to'liq uzunligida qayta chiqarilishiga

asoslanadi. Bu jarayon molekulalarning elektron qo'zg'alish holati bilan bog'liq bo'lib, o'pka, saraton hujayralari, bakteriyalar yoki metabolik markerlar fluorestsent bo'yoqlar bilan belgilanganida ularning joylashuvi va faolligi aniq ko'rinadi. Fluorestsent mikroskopiya, konfokal mikroskopiya, vaqtga bog'langan fluorestsent spektroskopiya kabi texnologiyalar molekulyar diagnostikaning asosiy vositalaridan hisoblanadi.

Optik diagnostikaning klinik qo'llanilishi turli yo'nalishlarda o'z ifodasini topadi. Oftalmologiyada retina, g'ilof, shox pardadagi o'zgarishlarni aniqlash; dermatologiyada terining mikroskopik strukturalarini o'rganish; kardiologiyada aterosklerotik blyashkalarni baholash; onkologiyada o'smalarning molekulyar markerlarini aniqlash; jarrohlikda optik navigatsiya tizimlari orqali to'qimalarni real vaqt rejimida monitoring qilish kabi usullar aynan optik fizikaga asoslanadi. Bu texnologiyalar invazivlik darajasining pastligi, aniqlikning yuqoriligi, xavfsizlik ko'rsatkichlarining yuqori bo'lishi sababli tibbiyotning zamonaviy standartiga aylangan.

Optik diagnostikada signallarni qayta ishlash ham alohida ahamiyatga ega. Tasvir sifatini oshirish uchun filtratsiya, to'liq transformatsiyalari, Fourier transformatsiyasi, fazoviy–spektral tahlil, kontrastni kuchaytirish, segmentatsiya va tasvirni rekonstruksiya qilish algoritmlaridan foydalaniladi. Zamonaviy optik diagnostika tizimlari sun'iy intellekt bilan integratsiyalangan bo'lib, tasvirlardagi patologik o'zgarishlarni avtomatik aniqlash imkoniyatini yaratmoqda.

Shu tariqa, optik diagnostika fizik tamoyillarning tibbiyotga muvaffaqiyatli tatbiq etilishining yorqin namunasidir. Yorug'likning tirik to'qimalar bilan o'zaro ta'siri orqali olingan ma'lumotlar organizmning morfologik, funksional va molekulyar holati haqida chuqur va ishonchli diagnostik xulosalar chiqarish imkonini beradi. Bu esa optik fizikani zamonaviy klinik amaliyotning ajralmas bo'limiga aylantiradi.

1.4.2. Ultratovush diagnostikasi.

Ultratovush diagnostikasi zamonaviy klinik tibbiyotda eng keng qo'llaniladigan, xavfsiz, invaziv bo'lmagan, nisbatan arzon va real vaqt rejimida tasvir olish imkoniyatiga ega bo'lgan muhim diagnostik usullardan biri bo'lib, uning ilmiy poydevori akustik fizikaning yuqori chastotali mexanik to'lqinlar haqidagi qonuniyatlariga asoslanadi. Ultratovush to'lqinlari inson qulog'i eshita olmaydigan, odatda 1 megagertsdan 20 megagertsgacha bo'lgan chastota diapazonida tarqalib, to'qimalar ichida o'ziga xos tarzda akslanadi, yutiladi, singadi yoki sochiladi. Bu xususiyatlar to'qimalarning zichligi, elastikligi, akustik impedansi, strukturaviy bir tekisligi va ichki organlarning akustik chegaralari bilan belgilanadi. Shu sababli ultratovush diagnostikasi to'qimalarning ichki tuzilishini, organlararo chegaralarni, patologik o'zgarishlarni, qon oqimi parametrlarini aniqlashda yuqori sezuvchanlikka ega.

Ultratovushning to'qimalar ichida tarqalish mexanizmi akustik to'lqin tenglamalari bilan ifodalanadi. To'lqinlarning tezligi har bir to'qimada farqlanib, suyaklarda 3000–4000 m/s, mushaklarda 1500–1600 m/s, yog' to'qimasida 1400 m/s atrofida bo'ladi. Ultratovush to'lqinlarining to'qimalar chegarasida akslanish darajasi akustik impedans farqiga bog'liq. Akustik impedans zichlik va to'lqin tezligining ko'paytmasi bo'lib, ikki to'qima o'rtasidagi bu parametrning farqi qanchalik katta bo'lsa, akslanish intensivligi shunchalik yuqori bo'ladi. Masalan, suyak va yumshoq to'qima orasidagi impedans farqi katta bo'lgani uchun akslanish kuchli bo'ladi va tasvirdagi suyak strukturasi aniq ko'rinadi. Aksincha, mushak–yog' to'qimalari chegarasida impedans farqi kichik bo'lgani uchun akslanish kuchsizroq bo'ladi.

Ultratovush apparatlarining ishlash prinsipi piezoelektrik effektga asoslangan bo'lib, unda piezoelektrik kristallar elektr signali ta'sirida yuqori chastotali mexanik tebranish hosil qiladi va aksincha, qabul qilingan mexanik tebranishni elektr signaliga aylantiradi. Shu orqali apparat to'lqinlarni yuborish va qabul qilish

vazifasini bajaradi. Qaytgan signallar intensivligi va ularga ketgan vaqt ultratovush tasvirini rekonstruksiya qilishda asosiy parametr sifatida xizmat qiladi.

Ultratovush diagnostikasining asosiy afzalliklaridan biri real vaqt rejimida tasvir olish imkoniyati bo'lib, bu yurakning qisqarish sikllari, homiladorlikda homilaning harakati, ichki organlarning dinamik faoliyati, mushak–skelet tizimidagi harakatlar kabi jarayonlarni kuzatish imkonini beradi. Shuningdek, ultratovushning xavfsizligi uning diagnostik ahamiyatini yanada kengaytiradi, chunki ultratovush ionlashtiruvchi nurlanishga ega emas va to'qimalarda kimyoviy o'zgarishlarni yuzaga keltirmaydi.

Ultratovush diagnostikasi Doppler tamoyiliga asoslangan bo'lib, harakatdagi ob'ektlardan qaytgan to'lqinlarning chastotasi o'zgaradi. Qon oqimining tezligini aniqlashda eritrotsitlardan qaytgan to'lqinlar chastotasi siljishi o'lchanadi va shu orqali qon oqimining yo'nalishi, tezligi, turbulent yoki laminar xarakteri haqida aniq ma'lumot olish mumkin. Bu yurak kasalliklari, qon tomirlarining torayishi, tromblar, arteriyalardagi stenozlar yoki o'pkaning qon ta'minoti buzilishlarini aniqlashda beqiyos ahamiyatga ega.

Ultratovush diagnostikasi tasvirlarning bir necha rejimlarda qayd etilishini ta'minlaydi. B-rejim (brightness mode) organlarning ikki o'lchamli yorqinlik xaritasini hosil qiladi. M-rejim (motion mode) harakatdagi tuzilmalarning vaqt bo'yicha o'zgarishini kuzatish uchun mo'ljallangan bo'lib, ayniqsa kardiologiyada yurak klapanlarining harakatini baholashda keng qo'llaniladi. Doppler rejimi esa qon oqimini baholash imkonini beradi. Rangli Doppler kartasi oqim yo'nalishini ranglar orqali ko'rsatadi, bu esa klinik amaliyotda juda qulay.

To'lqinlarning sochilishi ultratovush diagnostikasining aniqligiga ta'sir qiluvchi muhim omillardandir. Tirik to'qimalar geterogen struktura bo'lgani uchun to'lqinlar turli yo'nalishlarda sochiladi va bu tasvirda akustik shovqinlar paydo bo'lishiga sabab bo'ladi. Shuning uchun apparatlar ko'p elementli transduserlardan foydalanadi va fazali antennalar yordamida to'lqin frontlarini fokuslash,

chuqurlikni boshqarish va yo‘nalishni o‘zgartirish imkonini beradi. Shu bilan tasvir aniqligi va kontrasti oshiriladi.

Ultratovush to‘lqinlarining yutilishi ham klinik amaliyotda muhimdir. Yutilish chastotaga bog‘liq bo‘lib, yuqori chastotali to‘lqinlar tez yutiladi, past chastotalar esa chuqurroq o‘tadi. Shu sababli yuzaki organlar (limfa tugunlari, teri osti to‘qimasi, ko‘z)ni tekshirishda yuqori chastotali sensorlardan, chuqur organlar (jigar, buyrak, o‘pka, yurak)ni tekshirishda past chastotali sensorlardan foydalaniladi.

So‘nggi yillarda elastografiya texnologiyasi jadal rivojlanmoqda. Elastografiya ultratovush to‘lqinlarining to‘qimalardagi mexanik javobini o‘lchash orqali to‘qimalarning qattqlik darajasini baholaydi. Fibroz, shishlar, yallig‘lanish jarayonlari, o‘sma to‘qimalar qattqligi bilan farqlanadi, shuning uchun elastografiya diagnostika aniqligini sezilarli oshiradi.

Ultratovush diagnostikasining klinik qo‘llanilishi juda keng bo‘lib, kardiologiya, gastroenterologiya, urologiya, ginekologiya, akusherlik, travmatologiya, pediatriya, onkologiya va reanimatsiya sohalarida asosiy diagnostik vosita sifatida xizmat qiladi. Uning invaziv bo‘lmaganligi, xavfsizligi, takroran qo‘llash imkoniyati va yuqori aniqligi bu texnologiyani zamonaviy tibbiyotning ajralmas qismiga aylantirmoqda.

Shu tariqa, ultratovush diagnostikasi inson organizmidagi akustik jarayonlar va to‘qimalarning fizik xossalarini chuqur o‘rganishga asoslangan, ilmiy va klinik ahamiyati nihoyatda yuqori bo‘lgan diagnostik texnologiyadir. Ultratovushning fizik modellari, to‘lqinlarning tarqalishi, akslanishi, yutilishi va Doppler effekti asosida tasvirlarni hosil qilish jarayonlari ushbu metodni tibbiy diagnostikaning eng ishonchli yo‘nalishlaridan biriga aylantiradi.

1.4.3. Elektromagnit diagnostika.

Elektromagnit diagnostika zamonaviy tibbiy tasvirlash va fiziologik monitoring tizimlarining eng muhim ilmiy yo'nalishlaridan biri bo'lib, u elektromagnit maydonlarning turli diapazonlarda tirik to'qimalar bilan o'zaro ta'siriga asoslangan bo'ladi. Elektromagnit energiya radioto'lqinlar, mikroto'lqinlar, infraqizil, ko'rinadigan yorug'lik, ultrabinafsha, rentgen va gamma nurlarini o'z ichiga olgan keng spektrni qamrab oladi, har bir diapazon organizm to'qimalari bilan o'ziga xos tarzda ta'sirlashadi, bu esa turli diagnostik texnologiyalarning shakllanishiga zamin yaratadi. Elektromagnit diagnostikaning asosiy afzalligi shundaki, u organizmning ichki strukturalari, fiziologik funksiyalari va molekulyar tarkibi haqida invaziv bo'lmagan, yuqori aniqlikdagi hamda ko'p parametrlil ma'lumot berish imkonini yaratadi.

Elektromagnit diagnostikaning ilmiy poydevori Maxwell tenglamalari, elektromagnit to'lqinlarning tarqalish qonunlari, fotoelektr effekt, Compton sochilishi, yutilish koeffitsientlari, dielektrik xususiyatlar va to'qimalarning elektromagnit energiyani issiqlikka aylantirish jarayonlarini o'z ichiga oladi. Har bir diagnostik usul elektromagnit spektrning ma'lum diapazonidan foydalanib, to'qimalar bilan o'zaro ta'sirning fizik modelini yaratadi. Shu sababli elektromagnit diagnostikaning tahlil qilish qobiliyati juda keng: u suyaklarning zichligini, yumshoq to'qimalarning tuzilishini, qonning tarkibini, to'qimalarning molekulyar dinamikasini, hujayralarning elektr xatti-harakatini, metabolik jarayonlarni, hatto atom yadrolarining spin xususiyatlarini o'lchash imkonini beradi.

Elektromagnit diagnostikaning eng ko'p qo'llaniladigan yo'nalishlaridan biri rentgen diagnostikasidir. Rentgen nurlari yuqori energiyali fotonlar bo'lib, to'qimalardan o'tishda ular turlicha yutiladi va sochiladi. Suyaklar nurlarni kuchli yutadi, shuning uchun tasvirda oq rangda ko'rinadi; mushaklar va yumshoq to'qimalar esa nisbatan kam yutadi, bu esa kontrast hosil bo'lishiga yordam beradi.

Rentgen tasvirlarining shakllanishi fotoelektr effekt va Compton sochilishiga asoslanadi. Kompyuter tomografiya esa rentgen texnologiyasining rivojlangan shakli bo'lib, ko'plab burchaklardan olingan proeksiyalarni matematik rekonstruksiya qilish orqali uch o'lchamli tasvir yaratadi. CT apparatlarining algoritmlari Radon transformatsiyasi va filtrlangan qayta proeksiya modellariga tayanadi.

Elektromagnit diagnostikaning yana bir murakkab, ammo juda samarali usuli magnit-rezonans tomografiyadir. MRT kvant fizikasi tamoyillariga asoslanib, atom yadrolarining magnit maydon bilan o'zaro ta'sirini qayd qiladi. Kuchli statik magnit maydonda atom yadrolari ma'lum yo'nalishda moslashadi; radiochastotali impuls bilan qo'zg'atilganida esa ular energiya yutadi va so'ngra qayta chiqaradi. Ushbu jarayonning davomiyligi T1 va T2 relaksatsiya vaqtlarini ifodalaydi. Har bir to'qimaning relaksatsiya parametrlari turlicha bo'lgani uchun MRT tasvirlari organlarning morfologik farqlarini juda aniq aks ettiradi. MRTning muhim afzalligi ionlashtiruvchi nurlanishdan foydalanmasligi va yumshoq to'qimalarni ayniqsa aniq ko'rsatishidir.

Mikroto'lqinli diagnostika elektromagnit spektrning mikroto'lqinlar diapazoniga tayanib, to'qimalarning dielektrik xususiyatlariga asoslanadi. To'qimalarning dielektrik doimiyliigi va o'tkazuvchanligi ularning tarkibi, suyuqlik miqdori, ionlar kontsentratsiyasi va patologik o'zgarishlar bilan bevosita bog'liq. Mikroto'lqinli tasvirlash saraton to'qimalari, shishlar, yallig'lanish o'choqlari yoki suv tarkibi yuqori bo'lgan hududlarni aniqlashda muhim diagnostik imkoniyat beradi. Bu texnologiya hali rivojlanish bosqichida bo'lsa ham, uning ilmiy fundamenti elektromagnit energiyaning to'qimalarda yutilish koeffitsientlariga tayanadi.

Infraqizil diagnostika esa organizmning infraqizil nurlanishini qayd etish orqali amalga oshiriladi. Tana yuzasidan chiqayotgan infraqizil nurlanish haroratning taqsimoti haqida ma'lumot beradi va bu termografiya texnologiyasining asosini tashkil qiladi. Yallig'lanish o'choqlari, qonni ko'payishi, neoplaziyalar kabi

holatlar lokal haroratning oshishi orqali aniqlanadi. Termografiya issiqlik nurlanishini Stefan–Boltzman qonuni asosida baholaydi.

Elektromagnit diagnostikaning yana bir yo‘nalishi elektroimpedans tomografiya bo‘lib, u to‘qimalarning elektr o‘tkazuvchanligi va dielektrik xususiyatlarini o‘lchaydi. Tana yuzasiga kichik amplitudali o‘zgaruvchan tok yuborilib, boshqa nuqtalarda hosil bo‘lgan potentsiallar qayd qilinadi. Elektr maydonlarining tana ichida tarqalishi Laplas tenglamasi asosida modellashiriladi va shu orqali to‘qimalarning o‘tkazuvchanlik xaritasi qayta tiklanadi. Bu usul o‘pka ventilyatsiyasini monitoring qilish, shishlar, nekroz yoki suyuqlik to‘planishi kabi jarayonlarni aniqlashda qo‘llaniladi.

Elektromagnit diagnostikaning past chastotali diapazoni elektrofiziologik jarayonlarni o‘lchashda qo‘llaniladi. Yurak va miya faoliyati ionlarning membrana bo‘ylab harakatiga asoslangan bo‘lib, bu jarayonlar organizmning bioelektrik signallarini hosil qiladi. Elektrokardiografiya yurakning elektr faolligini qayd etadi; elektroensefalografiya miya neyronlarining sinxron postsinaptik potentsiallari faoliyatini aks ettiradi; elektromiografiya skelet mushaklarining elektr javobini o‘lchaydi. Bu jarayonlar to‘qimalarning o‘tkazuvchanligi, membrana kapasitivi, ionlarning tarqalish tezligi kabi fizik parametrlar bilan chambarchas bog‘liq.

Elektromagnit diagnostikada xavfsizlik masalalari ham muhimdir. Ionlashtiruvchi nurlanish (rentgen, gamma nurlari) yuqori dozada DNKga zarar yetkazishi mumkin, shuning uchun diagnostika apparatlari minimal dozani berish uchun optimallashtirilgan bo‘lishi kerak. Radiochastotali energiya esa to‘qimalarda issiqlik hosil qiladi, shuning uchun MRT apparatlarida SAR (spetsifik yutilish koeffitsientlari) qat’iy nazorat qilinadi.

Shu tariqa, elektromagnit diagnostika fizik qonuniyatlarning tibbiyotga tatbiqining eng rivojlangan yo‘nalishlaridan biri bo‘lib, u to‘qimalarning elektromagnit energiya bilan o‘zaro ta’siridan foydalanib, inson organizmining ichki struktura va funksiyalarini aniqlash imkonini beradi. Elektromagnit spektrning turli

diapazonlari turlicha klinik maqsadlarda qo'llanilib, zamonaviy tibbiyot diagnostikasining ilmiy asosini tashkil etadi.

II-BOB. BIOFIZIK USULLARNING MUHANDISLIKDA QO'LLANILISHI.

2.1. Fizik optikaning tibbiy optikadagi amaliy ahamiyati.

Fizik optika tibbiy optikaning nazariy poydevorini tashkil etuvchi fundamental yo'nalish bo'lib, yorug'likning to'qimalar bilan o'zaro ta'siri, uning sinishi, yutilishi, akslanishi, interferensiyasi, difraksiyasi, polarizatsiyasi, koherentligi kabi fizik hodisalarni chuqur o'rganadi va ularni tibbiy diagnostika, jarrohlik hamda terapiya amaliyotiga tatbiq etadi. Tibbiy optika, aslida, fizik optika qonuniyatlarining tirik to'qimalar, organlar va biomolekulalar darajasida qo'llanilishidir. Shu sababli fizik optika tibbiy texnologiyalarning asosiy ilmiy tayanchi bo'lib xizmat qiladi va yangi optik diagnostik qurilmalar hamda optik-terapevtik usullarni yaratishda asosiy metodologik platformani taqdim etadi.

Tirik to'qimalarning optik xususiyatlari yorug'likning fizik tabiatiga bog'liq tarzda o'zgaradi va bu xususiyatlar to'qimalarning tarkibi, strukturasining murakkabligi, suv miqdori, oqsil va pigmentlarning mavjudligi, xromoforlarning yutilish spektrlari, hujayraviy mikroarkitektura kabi ko'plab parametrlar bilan aniqlanadi. Fizik optikaning asosiy qonunlari — Snell sinish qonuni, yutilish qonuni, sochilish nazariyalari, interferensiya va difraksiya tamoyillari, Beer–Lambert qonuni, Mie va Reyli nazariyalari — tibbiy optik qurilmalar ishining texnik asosini tashkil qiladi.

Fizik optikaning tibbiy amaliyotga ta'siri eng avvalo tasvirlash texnologiyalarida yaqqol namoyon bo'ladi. Masalan, oftalmologik diagnostika qurilmalari yorug'likning to'g'ri, sinish va akslanish xususiyatlariga asoslanib ko'zning anatomik qatlamlarini mikrometr aniqlikda tasvirlaydi. Optik koherent tomografiya interferensiya tamoyillariga asoslanib, to'qimalarning ko'p qatlamli, yuqori aniqlikli uch o'lchamli tasvirini yaratadi. Bu texnologiyaning muvaffaqiyati fizik

optikadagi koherent yorug'lik manbalari, interferensiya naqshlarini qayd etish va optik yo'llarning farqini mikroskopik aniqlikda o'lchash imkoniyati bilan chambarchas bog'liqdir.

Fizik optikaning muhim qismi bo'lgan spektroskopiya tibbiy optikada klinik diagnostikaning molekulyar darajasini yaratadi. To'qimalar tomonidan yutilgan yoki chiqarilgan yorug'likning spektral xususiyatlari ularning biokimyoviy tarkibi haqida batafsil ma'lumot beradi. Yaqin infraqizil spektroskopiya qonning oksigenatsiya holatini aniqlashda, Raman spektroskopiya esa molekulalarning vibratsion holatini o'lchash orqali o'smalar yoki metabolik o'zgarishlarni aniqlashda qo'llaniladi. Spektral yutilish hodisalari fizik optikaning to'lqin-molekula o'zaro ta'siri haqidagi qonunlari bilan izohlanadi.

Polarizatsiyalangan yorug'lik diagnostikasi tibbiy optikada asosiy yo'nalishlardan biri bo'lib, u to'qimalarning anizotrop xususiyatlari, kollagen tolalari yo'nalishi, mushak strukturasining tartiblanganligi, terining mikroarkitektura kabi ko'plab biologik elementlarni baholash imkonini beradi. Polarizatsiyalash hodisasi fizik optikaning elektromagnit to'lqinlarning yo'nalishli tebranishlari haqidagi fundamental qonunlariga asoslanadi.

Optik diagnostika tizimlarining rivojlanishida difraksiya va interferensiya ham katta ahamiyatga ega. Konfokal mikroskopiya yorug'likning fokuslanish va difraksiyalanish tamoyillariga asoslanib, to'qimalarning chuqur qatlamlaridan yuqori aniqlikli tasvirlar olish imkonini beradi. Interferensiya esa optik koherent tomografiyada yoki golografik tasvirlashda ishlatiladi. Bu jarayonlarda yorug'likning koherentligi, fazaviy bir jinsliliigi, interferensiyalash qobiliyati fizik optikaning amaliy natijasidir.

Fizik optikaning tibbiy amaliyotdagi eng muhim yo'nalishlaridan biri optik terapiyadir. Lazerlar fizik optikaning koherent yorug'lik haqidagi qonunlariga asoslanadi va tibbiyotda aniq, yo'naltirilgan energiya manbai sifatida qo'llaniladi. Lazerning to'qima bilan o'zaro ta'siri yutilish koeffitsientlari, issiqlikka aylanish

jarayoni, fotokimyoviy reaksiyalar, fototermal va fotoablatsiya jarayonlari orqali amalga oshadi. Lazer koagulyatsiya, fotodinamik terapiya, dermatologik jarrohlik, koʻz jarrohligi (masalan, LASIK operatsiyalari) fizik optikaning amaliy yutuqlariga bevosita tayangan holda bajariladi.

Fizik optika tibbiy optikada faqat diagnostika va terapiya bilan cheklanmaydi, balki optik biosensorlar yaratish, nanofotonik tibbiy qurilmalar ishlab chiqish, mikroskopik tasvirlash tizimlarini modernizatsiya qilishda ham fundamental rol oʻynaydi. Nanofiberlar, optik tolalar va mikrorezonatorlar optik signalni tashish, fokuslash, kuchaytirish kabi jarayonlarda keng qoʻllanilib, tibbiy optikaning yangi avlod texnologiyalarini shakllantirmoqda.

Fizik optikaning tibbiy optikadagi amaliy ahamiyati klinik diagnostikaning aniqligini oshirish, invaziv usullarsiz tashxis qoʻyish, toʻqimalarning molekulyar tarkibi haqida chuqur maʼlumot olish, jarrohlikning aniqligini kuchaytirish, minimal invaziv operatsiyalarni amalga oshirish va reabilitatsiya jarayonlarini tezlashtirish kabi koʻplab yoʻnalishlarda sezilarli ahamiyat kasb etadi. Shu bois fizik optika bilan bogʻliq fundamental tadqiqotlar tibbiyot fanining rivojlanishi uchun mutlaq zaruratdir.

2.1.1. Tibbiy diagnostikada optik hodisalarning fizik asoslari.

Tibbiy diagnostikada optik hodisalar yorugʻlikning tirik toʻqimalar bilan oʻzaro taʼsiriga asoslanib, organizmning morfologik, funksional va molekulyar xususiyatlari haqida chuqur, invaziv boʻlmagan va real vaqt rejimida maʼlumot beruvchi eng muhim fizik jarayonlar majmuasini tashkil etadi. Optik hodisalar tibbiy optikaning nazariy poydevoridir va ular yorugʻlikning tabiati, elektromagnit toʻlqinlarning tarqalishi, fotonlarning modda bilan oʻzaro taʼsiri, kvant energiya almashinuvi, toʻqimalarning optik parametrlari, interferensiya, difraksiya, poliarizatsiya, yutilish va sochilish kabi asosiy fizik qonuniyatlarga tayanadi. Shu sababli optik hodisalar tibbiy diagnostikaning barcha optik qurilmalarida —

oftalmoskopiya, endoskopiya, mikroskopiya, optik koherent tomografiya, spektroskopiya, pulsoksimetriya, lazer diagnostikasi va boshqa ko'plab texnologiyalarda markaziy o'rin tutadi.

Optik hodisalarning eng muhimlaridan biri yorug'likning yutilishi bo'lib, uning fizik mohiyati fotonlarning to'qima ichida joylashgan xromofor molekulari tomonidan energiya sifatida qabul qilinishi bilan izohlanadi. Tirik to'qimalarda asosiy xromoforlar gemoglobin, melanin, suv molekulari, riboflavin, lipoproteinlar va boshqa pigmentlardir. Har bir xromoforning o'ziga xos yutilish spektri mavjud bo'lib, bu ularga turli to'lqin uzunliklarida har xil intensivlikda yorug'likni yutish imkonini beradi. Bu jarayon Beer–Lambert qonuni orqali matematik ifodalanadi va optik diagnostikada qonning kislorodga to'yinganligini o'lchash, teri pigmentatsiyasini baholash, o'smalarning molekulyar tarkibini aniqlash kabi ko'plab sohalarda qo'llaniladi.

Yorug'likning to'qimalarda sochilishi ham optik diagnostikaning asosiy omillaridan biridir. Tirik to'qimalar murakkab geterogen muhit bo'lgani sababli yorug'lik turli yo'nalishlarda sochiladi, bu jarayon Mie va Reyli sochilish nazariyalari orqali izohlanadi. Katta radiusga ega strukturalar, masalan, hujayralar, yadro, organellalar Mie sochilishiga sabab bo'ladi, kichik molekularlar esa Reyli sochilishini yuzaga keltiradi. Sochilish optik signallarning tarqalish masofasini, tasvirning kontrasti, aniqligi va chuqurlik penetratsiyasini belgilaydi. Tibbiy diagnostikaning juda ko'p texnologiyalarida — teri diagnostikasi, o'pka perfuziyasi, o'smalar aniqligi, mikroskopiya — aynan sochilish jarayoni tahlil qilinadi.

Sinish hodisasi optik diagnostikaning yana bir fundamental tamoyili bo'lib, yorug'likning ikki turli muhit chegarasidan o'tganda tezligining o'zgarishi natijasida yo'nalish o'zgarishidan iboratdir. Bu hodisa Snell qonuni bilan izohlanadi va ayniqsa oftalmologiyada, linsalarning va ko'zning optik tizimining ishlashida, shuningdek endoskopik optik tizimlarda muhim rol o'ynaydi. Ko'zning

shox pardasi va gavhari yuqori sinish ko'rsatkichi bilan ajralib turadi, shu sababli sinish jarayonlari ko'rish mexanizmining asosiy fizik platformasini tashkil qiladi. Endoskopik diagnostikada esa sinish hodisasi yorug'likni tor kanallardan o'tkazish, fibrotolalar orqali signalni uzatish va ichki organlarni tasvirlashda muhim ahamiyatga ega.

Akslanish jarayoni ham optik diagnostikaning asosiy fizik jarayonlaridan biri hisoblanib, yorug'likning to'qima chegarasidan qaytishi tasvir hosil bo'lishida katta rol o'ynaydi. Akslanish darajasi to'qimalarning optik zichligi, refraktiv indeks farqi, yuzaning silliqdigi yoki notekisligiga bog'liq bo'lib, bu jarayon endoskopiya, dermatoskopiya, ko'z fundusini tasvirlash va optik koherent tomografiyada keng qo'llaniladi.

Interferensiya optik diagnostikaning eng murakkab va yuqori aniqlikdagi tamoyillaridan biri bo'lib, ikki yoki undan ortiq koherent yorug'lik nurlarining bir-biriga qo'shilishi natijasida hosil bo'lgan intensivlik naqshining o'zgarishi bilan tavsiflanadi. Interferensiya hodisasi optik koherent tomografiyaning asosini tashkil qiladi, unda interferensiya naqshlari to'qimalarning ichki qatlamlarining masofasini submikron aniqlikda o'lchashga imkon beradi. Bu texnologiya retina diagnostikasi, yurak tomirlari ichki qatlamlarini o'rganish, teri mikroyuzasini baholash kabi ko'plab sohalarda qo'llaniladi.

Difraksiya jarayoni yorug'likning tor tirqishlardan o'tganda yoki kichik obyektlarga duch kelganda yoyilishi bilan tavsiflanib, mikroskopiya texnologiyalarida tasvir aniqligining chegarasini belgilaydi. Difraksion chegarani yengish uchun konfokal mikroskoplar, superrezolyutsiya texnologiyalari, adaptiv optika tizimlari ishlab chiqilgan bo'lib, ularning barchasi fizik optikaning difraksiya qonunlarining chuqur tahliliga asoslanadi.

Polarizatsiya hodisasi ham tibbiy optikada katta amaliy ahamiyatga ega. Polarizatsiyalangan yorug'lik to'qimalarining strukturaviy tartiblilikini, kollagen tolalarining yo'nalishini, mushak to'qimasining anizotropiyasini aniqlashda

qo'llaniladi. Polarizatsion optikaning fizik asoslari elektromagnit to'qlinlarning yo'nalgan tebranishlariga tayanadi va qator klinik qurilmalarning ishlash mexanizmini belgilaydi.

Fluorestsent hodisa yorug'likning molekula tomonidan yutilishi va boshqa to'qlin uzunligida qayta chiqarilishi bo'lib, u molekulalarning elektron qo'zg'alish holatiga o'tishi bilan bog'liq. Fluorestsent diagnostika saraton hujayralarini, bakteriyalarni, metabolik faol markerlarni aniqlashda keng qo'llaniladi. Fluorestsent mikroskopiya, konfokal mikroskopiya va optik biosensorlar ushbu hodisaning fizik tamoyillariga asoslanadi.

Tibbiy diagnostikada optik hodisalarning amaliy qiymati shundaki, ular klinik jarayonlarda to'qimalar haqida chuqur axborot olishga imkon beradi. Yorug'likning yutilish, sochilish, akslanish, interferensiya va poliarizatsiya jarayonlari tibbiy tasvirlarning aniqligi, kontrasti, differensial diagnostika imkoniyatlarini belgilaydi. Shu sababli optik hodisalarning fizik asoslarini chuqur bilish optik diagnostika qurilmalarini loyihalash, klinik protokollarni ishlab chiqish va yangi texnologiyalar yaratishda fundamental ahamiyatga ega.

2.1.2. Amaliy tibbiyotda optik qurilmalar va texnologiyalar.

Amaliy tibbiyotda optik qurilmalar va texnologiyalar organizmning morfologik, funksional va molekulyar xususiyatlarini aniqlashda eng ishonchli, keng qo'llanadigan va yuqori aniqlikka ega bo'lgan tibbiy uskunalar majmuasini tashkil qiladi. Optik texnologiyalar yorug'likning to'qimalar bilan o'zaro ta'sirining fizik tamoyillariga asoslanib, organizmning ichki tuzilishini invaziv bo'lmagan tarzda ko'rish, to'qimalardagi biokimyoviy o'zgarishlarni monitoring qilish, patologik jarayonlarni aniqlash va jarrohlik manipulyatsiyalarni aniq va xavfsiz bajarish imkoniyatini yaratadi. Optik qurilmalar tibbiyotning barcha sohalarida, xususan oftalmologiya, dermatologiya, onkologiya, kardiologiya,

gastroenterologiya, otorinolaringologiya, stomatologiya, neyroxirurgiya va jarrohlik amaliyotida keng qo'llanilmoqda.

Optik qurilmalar tizimida eng an'anaviylardan biri oftalmoskop va biomikroskop bo'lib, ular ko'zning optik muhitlari — shox parda, gavhar, shisha modda va retina qatlamlarini yoritish va optik kattalashtirish tamoyillariga asoslanadi. Oftalmoskopiya qaytgan yorug'likning akslanish darajasi va retina pigmentlarining yutilish spektri orqali ko'rish asboblari fundusdagi mikrostrukturalarni yuqori aniqlikda aks ettiradi. Shuningdek, biomikroskopiya (yarim yoritilgan yorug'lik ostida) sinish ko'rsatkichlarining farqiga asoslanib, ko'zning old segmenti anatomik tuzilmalarini mikrometr darajasida ko'rishga imkon beradi.

Endoskopiya texnologiyasi optik nilufar tolalari, linzalar tizimi, kameralar va yoritish manbalaridan foydalanib, ichki organlarni tabiiy teshiklar yoki kichik kesmalar orqali real vaqt rejimida ko'rishga imkon yaratadi. Optik tolalar yorug'likni minimal yo'qotish bilan uzatadi, sinish va akslanish tamoyillari esa tasvirning sifatini belgilaydi. Endoskopiya orqali ovqat hazm qilish tizimi, nafas yo'llari, urogenital tizim va boshqa ko'plab organlar ko'zdan kechiriladi. Fibroendoskoplar yorug'likni butun tolalar orqali yetkazib, juda egiluvchan strukturasi sababli murakkab anatomik yo'llardan ham o'tish imkoniyatini beradi.

Optik koherent tomografiya (OCT) zamonaviy tibbiy optikaning eng yuqori aniqlikli texnologiyalaridan biri bo'lib, interferensiya tamoyillariga asoslanadi. OCT qurilmalari yaqin infraqizil yorug'lik nurlarining to'qimalardan akslanishi va referensiya nuri bilan interferensiyalashuvi natijasida mikrometr darajasida chuqurlik bo'yicha kesma tasvir hosil qiladi. Bu texnologiya retina patologiyalarini aniqlashda, tomir devorlari tuzilishini o'rganishda, terining mikrostrukturasini baholashda keng qo'llaniladi. Interferensiya naqshlarini raqamli qayta ishlash orqali to'qimalarning 3D modeli ham tiklanishi mumkin.

Spektrofotometriya va spektroskopiya qurilmalari to'qimalarning optik yutilish va sochilish xususiyatlarini o'lchash orqali biomolekulalarning tarkibi, konsentratsiyasi va funksional holati haqida ma'lumot beradi. Klinik amaliyotda yaqin infraqizil spektroskopiya qon kislorodlanishini aniqlaydi, Raman spektroskopiya esa molekulalarning vibratsion spektrlarini tahlil qilish orqali o'smalar, infeksiyalar, metabolik buzilishlar kabi patologik holatlarni aniqlashda qo'llaniladi.

Pulsoksimetrler qonning oksigenatsiya darajasini qizil va infraqizil to'lqin uzunliklaridagi yutilish koeffitsientlari farqiga asoslanib o'lchaydi. Bu qurilmalar gemoglobinning oksidlangan va dezoksidlangan shakllarining optik xususiyatlaridagi farqlarni aniqlab, arterial kislorod saturatsiyasini real vaqt rejimida baholaydi. Ularning fiziologik asosida Beer–Lambert qonuni yotadi.

Fluorestsent diagnostika texnologiyalari yorug'likning yutilishi va qayta chiqarilishi (fluoroforlarning qo'zg'alishi) tamoyillariga tayanadi. Fluorestsent mikroskopiya va konfokal mikroskopiya hujayralarning strukturasi va funksiyasini ultra yuqori aniqlikda aks ettiradi. Fluorestsent endoskopiyada esa o'smalar yoki patologik jarayonlar maxsus bo'yoqlar yordamida ajratilib ko'rinadi.

Laser diagnostikalari fizik optikaning koherent yorug'lik manbalari haqidagi tamoyillarini qo'llab, teri, pigmentlar, tomir tuzilmalari, shox parda yoki retina holatini aniqlashda keng qo'llanadi. Lazer spektrlari aniq to'lqin uzunliklarini tanlash imkoniyatini berib, ma'lum xromoforlarni selektiv tarzda qo'zg'atish yoki yoritish imkoniyatini yaratadi. Lazer dopplermetrleri esa lazer nurining eritrotsitlardan qaytish tezligiga asoslanib mikroqon aylanishni baholaydi.

Stomatologiyada intraoral skanerlar optik triangulyatsiya, strukturaviy yorug'lik va lazer interferensiya tamoyillariga asoslanib, tishlar va jag'ning uch o'lchamli yuqori aniqlikli modelini yaratadi. Ushbu texnologiyalar protezlash, implantatsiya va ortodontik rejalashtirish jarayonlarining sifatini sezilarli darajada oshiradi.

Dermatologiyada dermatoskoplar optik kattalashtirish, polarizatsiya va spektral tahlil tamoyillarini birlashtirgan holda terining pigmentatsiyasi, qon tomirlarining tuzilishi, nevuslar va melanomaning dastlabki belgilarini aniqlashda qo'llaniladi. Polarizatsiyali dermatoskopiya yuzaki akslanishini kamaytirib, teri osti strukturani yanada aniq ko'rsatadi.

Gastroenterologiyada spektral tor diapazonli vizualizatsiya (NBI – Narrow Band Imaging) yorug'likning tor spektr bo'ylab akslanishiga asoslanib, o'sma to'qimalari, yallig'lanish jarayonlari va mikrotomirlar tuzilishini aniqlashda katta klinik ahamiyatga ega. Bu texnologiyada gemoglobinning yutilish cho'qqilari asosga olingan bo'lib, pastki spektrlar orqali qon tomirlarining ko'rinishi kuchaytiriladi.

Optik texnologiyalar jarrohlik amaliyotida ham keng qo'llaniladi. Laparoskopik jarrohlik, mikroskopik neyroxirurgiya, tomir jarrohligi operatsiyalari optik linzalar, optik tolalar, HD kameralar va lazer yo'naltirish tizimlari orqali amalga oshiriladi. Bu usullar minimal invazivlik, yuqori aniqlik va jarrohlik xavfsizligini ta'minlaydi. Amaliy tibbiyotda optik texnologiyalarning keng qo'llanilishiga sabab ularning bir nechta afzalliklari — ionlashtiruvchi nurlanishdan holi bo'lishi, to'qimalarning fiziologik holatiga sezgirligi, molekulyar darajadagi axborot berishi, real vaqt rejimida tasvirlash imkoniyati va texnologik moslashuvchanligidir. Shu bois optik texnologiyalar zamonaviy tibbiyot diagnostikasining ajralmas qismiga aylangan.

2.2. Lazer texnologiyalarining tibbiy qo'llanilishi.

Lazer texnologiyalari zamonaviy tibbiyotning eng muhim va texnologik jihatdan rivojlangan yo'nalishlaridan biri bo'lib, ular fizik optikaning koherent, monoxromatik va yuqori yo'naltirilgan yorug'lik nuri haqidagi asosiy tamoyillariga tayangan holda diagnostika, jarrohlik, terapiya va reabilitatsiya jarayonlarida keng qo'llaniladi. Lazer nurlari fotonlarning fazaviy uyg'unligi, tor spektrli tarqalishi, yuqori energiya zichligi, o'ta aniq fokuslanish xususiyatiga ega

bo'lgani uchun tirik to'qimalarda selektiv tarzda ta'sir ko'rsata oladi. Bu esa ularni minimal invaziv, yuqori samarali va xavfsiz tibbiy texnologiyaga aylantiradi.

Lazer texnologiyalarining tibbiy amaliyotdagi ahamiyatini tushunish uchun, avvalo lazer nurlarining fizik xususiyatlarini e'tiborga olish zarur. Lazer nuri koherent bo'lib, barcha fotonlar bir xil fazada tarqaladi, bu esa uning energiyasini juda kichik maydonga fokuslash imkonini beradi. Monoxromatiklik esa tanlangan to'lqin uzunligida ishlashni ta'minlab, ma'lum xromoforlarni selektiv tarzda qo'zg'atish, yondirish yoki issiqlikka aylantirish imkonini yaratadi. Yorug'likning yuqori yo'naltirilganligi jarrohlik manipulyatsiyalarning aniqligini oshirib, qo'shni to'qimalarga minimal zarar yetkazilishini ta'minlaydi.

Lazer texnologiyalarining tibbiyotdagi eng rivojlangan yo'nalishlaridan biri lazer jarrohligidir. Lazer jarrohligida lazer nurlari to'qimalarni kesish, koagulyatsiya qilish, bug'lantirish yoki ablatsiya qilish uchun qo'llaniladi. Lazer energiyasi to'qimalar tomonidan yutilgach, lokal harorat oshadi va bu oqibatda hujayra strukturasi qaytarilmas tarzda buziladi. Ko'plab lazer turlari turli jarrohlik vazifalariga mos keladi: CO₂ lazerdan teri jarrohligida silliq ablatsiya uchun foydalaniladi, erbiy–yag lazerlari dentinda va suyak to'qimasida yuqori aniqlik bilan ishlaydi, Nd:YAG lazerlari esa chuqurroq penetratsiyaga ega bo'lgani uchun qon tomirlarini koagulyatsiya qilishda qo'llaniladi.

Oftalmologiyada lazer texnologiyalari eng keng qo'llanilgan va eng samarali amaliy yo'nalishlardan biridir. Lazer yordamida bajariladigan refraksion jarrohlik — LASIK, PRK, LASEK — ko'zning sinish nuqsonlarini to'g'rilashda fotorefraktiv ablatsiya tamoyiliga asoslanadi. Shuningdek, retinal yirtilishlarni lazer fotokoagulyatsiya usuli bilan davolash, glaukoma jarayonida trabekuloplastika o'tkazish, katarakta jarrohligida femtosekund lazerlardan foydalanish kabi amaliyotlar lazer texnologiyalarining amaliy salohiyatini yanada oshirmoqda. Bu jarayonlarda lazer nurlari optik energiyani juda aniq fokuslab, pigmentli to'qimalar tomonidan selektiv yutilishini ta'minlaydi.

Dermatologiyada lazer texnologiyalari estetik va terapevtik maqsadlarda keng qo'llanadi. Qizil qon tomirlarini yo'qotish, pigmentatsiya o'choqlarini kamaytirish, akne izlari va chandiqlarni yo'qotish, lazer epilyatsiya kabi jarayonlarda lazer nurlarining xromoforlarga selektiv yutilishi (selektiv fototermoliz) nazariyasi asosiy o'rin tutadi. Melanin, gemoglobin va suv molekullari ma'lum to'lqin uzunliklarida yorug'likni turlicha yutadi, shu sababli lazer teri osti strukturalariga o'ta aniqlik bilan selektiv ta'sir ko'rsatishi mumkin.

Onkologiyada lazer texnologiyalari fotodinamik terapiya shaklida qo'llaniladi. Bu usulda o'smalar ichiga maxsus fotosensibilizatorlar yuboriladi va ular lazer nuri ta'sirida aktiv holatga o'tib, kislorod radikallarini hosil qiladi. Bu radikallar o'smalarning hujayralarini selektiv tarzda nekrozga uchratadi. Fotodinamik terapiya kam invazivligi, selektivligi va sog'lom to'qimalarni maksimal darajada asrab qolishi bilan ajralib turadi.

Kardiologiyada lazer angioplastika texnologiyasi arteriyalardagi aterosklerotik blyashkalarni bug'lantirish yoki mikroablatsiya qilish orqali qon tomirlarining o'tkazuvchanligini tiklashga yordam beradi. Bu usul selektiv fototermal ta'sirga asoslanib, tomir devorlariga minimal zarar yetkazgan holda blyashkani yo'q qilish imkonini yaratadi.

Stomatologiyada lazer texnologiyalari karieslarni olib tashlash, tish pulpasini davolash, yumshoq to'qimalarni kesish, periodontal kasalliklarni bartaraf qilish va implantatsiya jarayonlarida keng qo'llaniladi. Lazer to'qima kontakt qilmasdan kesish imkoniyatini yaratadi, bu esa jarohatning kichik bo'lishi, qon ketishining kamligi va reabilitatsiyaning tez kechishiga sabab bo'ladi.

Reabilitatsiya va fizioterapiyada past intensivli lazer terapiyasi (LLLT) keng qo'llanib, hujayra metabolizmini, mikrosirkulyatsiyani, kollagen sintezini va to'qimalarning regeneratsiya jarayonini faollashtiradi. Bu ta'sirlar lazer nurlarining mitoxondrial sitoxrom-C kompleksini qo'zg'atishi va ATP ishlab chiqarishni oshirishi orqali amalga oshadi.

Diagnosticada lazer texnologiyalari optik koherent tomografiya, lazer dopplermetriyasi, spektral analizlar, konfokal skanerlar kabi yuqori aniqlikdagi qurilmalar orqali qo'llaniladi. Lazer dopplermetriyasi eritrotsitlarning harakat tezligiga asoslanib, mikroqon aylanish haqida aniq ma'lumot beradi. Lazer spektroskopiyasi esa biomolekulalarning energetik sathlari haqida chuqur diagnostik ma'lumot taqdim etadi.

Shu tariqa, lazer texnologiyalari fizik optikaning eng muhim qonuniyatlarini amaliy tibbiyotda keng qo'llash orqali diagnostika, jarrohlik, terapiya va reabilitatsiya jarayonlarida yuqori samaradorlik, minimal invazivlik, aniqlik va xavfsizlik ta'minlaydi. Lazerlar tibbiyotning deyarli barcha sohalariga kirib borgan bo'lib, kelajak medicine texnologiyalari rivojida ham yetakchi o'rin egallashi shubhasizdir.

2.2.1. Lazer jarrohlik. Lazer diagnostika. Tomir ichidagi lazer terapiyasi

Lazer texnologiyalarining tibbiy jarrohlik, diagnostika va terapevtik amaliyotlarda qo'llanilishi fizik optikaning koherent yorug'lik, monoxromatiklik, yuqori energiya zichligi, fokuslanish qobiliyati va tanlab yutilish tamoyillariga asoslanadi. Lazer nurlari to'qimalar bilan o'zaro ta'sirga kirishganda fotoablatsiya, fotokoagulyatsiya, fototermoliz, fotokimyoviy reaksiyalar yoki fotobiomodulyatsiya jarayonlari sodir bo'ladi. Ushbu tamoyillar lazer jarrohligining aniq kesish imkoniyatini, lazer diagnostikasining yuqori sezuvchanlik darajasini va tomir ichidagi lazer terapiyasining yuqori selektiv ta'sirini ta'minlaydi.

Lazer jarrohlik.

Lazer jarrohligi optik energiyani juda aniq va selektiv tarzda to'qimalarga yetkazish orqali ularni kesish, koagulyatsiya qilish, ablatsiya qilish yoki bug'lantirishga asoslanadi. Jarrohlikda qo'llaniladigan lazer nurlari odatda infraqizil yoki yaqin infraqizil diapazonda bo'lib, ular biologik to'qimalar

tomonidan samarali yutiladi. Lazer to‘lqin uzunligi ma’lum xromoforlar — suv, gemoglobin, melanin, oqsillar — bilan o‘ziga xos tarzda o‘zaro ta’sirlashadi va bu selektiv yutilish jarrohning maqsadga yo‘naltirilgan ta’sirini ta’minlaydi.

Lazer jarrohligida ablatsiya jarayoni yuzaga kelganda, lazer energiyasi to‘qima molekulalariga yuqori darajada energiya uzatadi va bu jarayon molekulalarning tez bug‘lanishiga olib keladi. Agar lazer energiyasi pastroq intensivlikda yetkazilsa, to‘qima qiziydi va koagulatsiya jarayoni sodir bo‘ladi. Shu tamoyillar tufayli lazer jarrohligi an’anaviy skalpellarga nisbatan minimal qon ketish, to‘qima atrofida kam travma, yuqori aniqlik va infeksiya xavfining pastligi kabi ustunliklarga ega.

Oftalmologiyada lazer jarrohligi eng keng rivojlangan yo‘nalishlardan bo‘lib, ko‘zning refraksion nuqsonlarini to‘g‘irlash (LASIK, PRK, SMILE), retinada lazer fotokoagulyatsiya, glaukoma jarrohligida lazer trabekuloplastika keng qo‘llaniladi. Bu amaliyotlarda lazer nurlari shox parda, retina yoki iris tuzilmalari tomonidan yutilish darajasiga qarab aniq fizik selektivlik ko‘rsatadi.

Dermatologik lazer jarrohligida pigmentatsiyalarni, tatuirovkalarni, qon tomirlarini, chandiqlarni, o‘asma to‘qimalarni bartaraf etish uchun turli to‘lqin uzunliklaridagi lazerlardan foydalaniladi. Ushbu jarayonlarda selektiv fototermoliz tamoyili asosiy o‘rinni egallaydi, ya’ni lazer energiyasi faqat ma’lum xromoforlar tomonidan yutiladi va atrofdagi to‘qimalar zarar ko‘rmaydi.

Jarrohlikda qo‘llaniladigan lazer turlariga CO₂, Er:YAG, Nd:YAG, diode lazerlar, argon lazerlari va femtosekund lazerlar kiradi. Har bir lazerning to‘lqin uzunligi, impuls davomiyligi, energiya zichligi va fokuslash darajasi o‘ziga xos bo‘lib, ular jarrohlik maqsadiga qarab tanlanadi.

Lazer diagnostika.

Lazer diagnostikasi lazer nurlarining biologik to‘qimalar bilan juda nozik, yuqori sezuvchanlikka ega bo‘lgan o‘zaro ta’sir tamoyillariga asoslanadi. Lazer diagnostikasi optik spektroskopiya, lazer dopplermetriyasi, fluorestsent tahlil,

lazerli konfokal mikroskopiya va optik koherent tomografiya kabi texnologiyalarni o'z ichiga oladi.

Lazer spektroskopiyasi lazer nurlarining o'ta tor spektrli ta'siri orqali to'qimalardagi molekulalarning energetik sathlarini o'lchaydi. Raman spektroskopiyasi, absorbttsiya spektroskopiyasi va stoks–antistoks jarayonlari biomolekulalarning vibratsion holati, kimyoviy tarkibi, oqsillar konformatsiyasi, o'smalarning metabolik o'ziga xosliklarini aniqlash imkonini beradi.

Lazer dopplermetriyasi esa lazer nurining eritrotsitlar tomonidan qaytarilishi jarayonida hosil bo'lgan chastota siljishini o'lchab, periferiya mikrosirkulyatsiyasi, teri qon ta'minoti, tomirlar tonusi va metabolik jarayonlar haqida aniq ma'lumot beradi. Bu texnologiya diabetik mikroangiopatiya, periferik asab tizimi buzilishlari, termoregulyatsiya kasalliklarini aniqlashda keng qo'llaniladi.

Lazer fluorestsent diagnostikasi esa to'qimalarga o'ziga xos fluoroforlar yuborilganda yoki tabiiy fluorescent pigmentlar mavjud bo'lganda ularning lazer nurlari ta'sirida qayta nurlanish energiyasi asosida tasvir olishga asoslanadi. U o'smalar, infeksiyalar, hujayraviy funksional o'zgarishlarni aniqlashda yuqori sezuvchanlikka ega.

Optik koherent tomografiya (OCT) lazer interferensiyasi orqali to'qimalarning mikroskopik qatlamlarining uch o'lchamli tasvirini beruvchi eng rivojlangan optik diagnostika texnologiyalaridan biridir. OCT ayniqsa retina kasalliklari, teri mikroyuzasi, yurak tomir devorlari va shilliq pardalarning strukturaviy holatini aniqlashda beqiyos ahamiyatga ega.

Tomir ichidagi lazer terapiyasi.

Tomir ichidagi lazer terapiyasi (EVLT – Endovenous Laser Therapy) venoz tomirlar kasalliklarini, xususan varikoz kengaygan venalarni davolashda qo'llaniladigan eng zamonaviy, minimal invaziv texnologiyalardan biridir. Ushbu usul lazer nurlarining tomir ichki qatlamidagi suv va gemoglobin tomonidan

yutilishiga asoslanadi, natijada tomir devorida termal koagulatsiya jarayoni sodir boʻladi.

Tomir ichidagi lazer terapiyasining fizik tamoyili quyidagicha: lazer nuri optik tolali kateter yordamida tomir ichiga yuboriladi, toʻlqin uzunligi tomir devoridagi xromoforlar tomonidan maksimal yutiladigan spektrda tanlanadi, bu lazer energiyasining toʻqimalar tomonidan tez va selektiv qabul qilinishini taʼminlaydi. Yutilgan energiya issiqlikka aylanadi va tomir devoridagi kollagen tolalari qisqaradi, shu bilan tomirning lümeni yopiladi.

Ushbu jarayon yopilgan tomirning keyinchalik fibrozlanishiga va normal qon oqimining sogʻlom tomirlar orqali qayta taqsimlanishiga olib keladi. Tomir ichidagi lazer terapiyasining afzalliklari: kesishsiz oʻtkazilishi, behushliksiz amalga oshirilishi, kam ogʻirqli boʻlishi, tez tiklanish, minimal kosmetik nuqson qoldirishi va yuqori samaradorlik koʻrsatkichidir.

Lazer terapiyada odatda 810 nm, 940 nm, 980 nm va 1470 nm diapazonidagi lazerlar qoʻllaniladi. 1470 nm lazerlar suv tomonidan yuqori yutilishi tufayli juda selektiv boʻlib, tomir devorlariga kuchli, aniq va xavfsiz taʼsir koʻrsatadi.

Tomir ichidagi lazer terapiyasi varikoz venalar, refluksli tomir yetishmovchiligi, retikulyar venalar, kapillyar kengayishlar kabi patologiyalarni davolashda yuqori klinik natija beradi va klassik jarrohlikni koʻplab hollarda toʻliq almashtirmoqda.

2.3. Elektrofizik usullar

Elektrofizik usullar zamonaviy tibbiyotning diagnostik, terapevtik va reabilitatsion yoʻnalishlarida keng qoʻllaniladigan texnologiyalar majmuasini tashkil etib, ularning nazariy poydevori elektr maydonlarining, ion oqimlarining, bioelektrik potentsiallarining va elektr energiyasining biologik toʻqimalar bilan oʻzaro taʼsiriga asoslanadi. Tirik toʻqimalarning elektroaktivligi, hujayra membranasining ion kanallari orqali boshqariladigan elektrokimyoviy jarayonlari, turli toʻqimalarning elektr oʻtkazuvchanligi, dielektrik xususiyatlari va impedans

spektrlari elektrofizik usullarni qo'llash imkoniyatini yaratadi. Elektrofizik usullar yordamida organizmdagi funksional jarayonlar invaziv bo'lmagan tarzda baholanadi, to'qimalarning strukturaviy yadrosi o'rganiladi, patologik jarayonlar aniqlanadi va ishlab chiqarilgan elektr energiyasi terapevtik maqsadlarda qo'llaniladi.

Elektrofizik usullarning asosida elektr maydonlari va oqimlarining biologik sistemalar ichida tarqalishini boshqaruvchi qonuniyatlar yotadi. Hujayra membranasi potensialining saqlanishi, ionlarning Na^+ , K^+ , Ca^{2+} va Cl^- kanallari orqali harakatlanishi, membrananing dielektrik qatlam sifatida tutgan roli, to'qimalarning rezistiv va reaktiv elementlar sifatidagi xususiyatlari elektrofizik rivojlanishning asosiy fizik komponentlaridir. Ushbu jarayonlar tibbiyotda elektrodiagnostika, elektroterapiya, bioimpedans tahlili, elektrostimulyatsiya, elektrokardiografiya, elektromiografiya, elektroensefalografiya kabi ko'plab usullarning amaliy asosini tashkil qiladi.

Elektrofizik diagnostika usullaridan eng keng tarqalganlari elektrokardiografiya (EKG), elektroensefalografiya (EEG) va elektromiografiya (EMG) bo'lib, ular turli fiziologik tizimlarning bioelektrik faolligi haqida aniq, raqamlashtirilgan ma'lumotlarni taqdim etadi. EKG yurakning har bir siklidagi elektr impulslarining tarqalishini qayd etib, sinoatriyal tugun, atrioventrikulyar tugun, His tolalari va Purkinje tolalarida sodir bo'ladigan depolarizatsiya–repolarizatsiya jarayonlarini matematik egri chiziqlar ko'rinishida aks ettiradi. EEG miya korteksidagi neyronlarning sinxron elektr faolligini qayd etib, turli ritmlar — alfa, beta, gamma, delta va teta to'lqinlarining paydo bo'lish mexanizmlarini fizika va neyrofiziologiya tamoyillariga tayanib tahlil qiladi. EMG esa skelet mushaklarida hosil bo'ladigan aksiyaviy potentsiallarning amplituda–chastota parametrlari orqali mushak va periferik nerv tizimi kasalliklarini aniqlashda qo'llaniladi.

Elektrofizik usullarning yana bir muhim yo'nalishi bioimpedans tahlili bo'lib, unda to'qimalar orqali o'tuvchi elektr oqimiga qarshilikni (rezistiv komponent) va elektr

maydonining to'qimalardagi dielektrik xususiyatlar tufayli yuzaga keladigan reaktiv responsni o'lchash amalga oshiriladi. Bu usul tanadagi suyuqlik balansini, yog' to'qimalari miqdorini, mushak massasini, elektrolitlar holatini va patologik o'zgarishlarni aniqlashda muhim o'rin tutadi. Bioimpedans o'lchovlarining chastotaga bog'liq o'zgaruvchanligi to'qimadagi ionlarning harakata qobiliyatiga, membrana kapasitansiga, hujayralararo suyuqlik miqdoriga va molekulyar strukturalarga bog'liqdir.

Elektrofizik terapiya usullarida esa elektr energiyasi to'qimalarga terapevtik maqsadda yetkaziladi. Elektrostimulyatsiya mushak to'qimalarida aksiyaviy potensial hosil qilish orqali mushak qisqarishini yuzaga keltirishi, nerv tolalarida impuls o'tishini tiklashi yoki og'riq mediatorlarini bloklashi mumkin. Transkutan elektr nerv stimulyatsiyasi (TENS) og'riqni kamaytirishda, funksional elektr stimulyatsiyasi esa falajlangan mushaklarning qayta faollashuvida qo'llaniladi. Bu jarayonlar elektr oqimining amplituda, chastota, impuls davomiyligi, tashkil etuvchi to'lqin shakli kabi fizik parametrlari to'g'ri tanlangan taqdirdagina samarali bo'ladi.

Elektroterapiyada yuqori chastotali diatermiya, ultrachastotali terapiya, radiochastotali ablatsiya kabi usullar keng qo'llaniladi. Bu usullarning asosida yuqori chastotali elektromagnit to'lqinlarning to'qimalarda issiqlik hosil qilishi, ionlarning yuqori chastotada tebranishi orqali molekulyar issiqlik energiyasining oshishi yotadi. Radiochastotali ablatsiya ayniqsa aritmiyalarni davolashda, o'sma to'qimalarini koagulyatsiya qilishda qo'llaniladi.

Tibbiy fizikada elektrostatik va elektrodinamik maydonlardan foydalanishga asoslangan yana bir muhim yo'nalish elektroporatsiya bo'lib, unda hujayra membranasi elektr maydon ta'sirida vaqtincha o'tkazuvchan bo'lishi ta'minlanadi. Bu jarayon gen terapiyasi, dorilarni hujayraga yetkazish, o'smalarning elektroximyoterapiyasi kabi amaliyotlarda juda katta ahamiyatga ega. Membrana kuchlanishining ortishi natijasida uni tashkil etuvchi fosfolipidlar

tartibining buzilishi vaqtinchalik mikroporalar hosil bo'lishiga olib keladi va ular orqali makromolekulalar hujayra ichiga kiradi.

Elektrofizik usullar tibbiy diagnostikaning zamonaviy evolyutsiyasida ham muhim rol o'ynaydi. Masalan, elektr impedans tomografiyasi tananing ichki strukturasi o'ta past kuchlanishli oqimlar yordamida rekonstruksiya qilish imkonini beradi. Ushbu texnologiya nafas olish jarayonlari, o'pka ventilyatsiyasi, qonning tomir bo'ylab taqsimlanishi kabi funksional jarayonlarni real vaqt rejimida kuzatish imkoniyatiga ega.

Elektrofizik usullarni samarali qo'llash uchun biologik to'qimalarning elektr xususiyatlari, ion kanallarining fiziologiyasi, membrananing dielektrik modeli, elektr maydonlarining tarqalish tenglamalari va elektrod tizimlarining konfiguratsiyasi chuqur o'rganilishi zarur. Tibbiy muhandislikda elektrofizik texnologiyalarni ishlab chiqish, ularni kalibrlash, xavfsizligini ta'minlash, signalni filtratsiya qilish va artefaktlardan tozalash muhim vazifalardan biri hisoblanadi.

Elektrofizik usullar o'zining fizik asoslari, diagnostik aniqligi, terapevtik samaradorligi, invazivlik darajasining pastligi va keng klinik qo'llanilish imkoniyatlari bilan biotibbiyotning zamonaviy taraqqiyotida alohida o'rin egallab, kompleks integrativ tibbiy texnologiyalar yaratishga zamin yaratmoqda.

2.3.1. EKG – miokard elektr modeli. EMG – mushak elektr faolligi. EEG – neyron elektrik dinamikasi

Elektrofiziologik diagnostika usullarining eng muhim qismlaridan biri yurak, mushak va miya faoliyatida hosil bo'ladigan bioelektr signallarni qayd qilish va ularni fizik-matematik modellar asosida tahlil qilishdir. Biologik tizimlarning elektr dinamika mexanizmlari har uchala tizimda turlicha bo'lsa-da, ularning umumiy fizik poydevori ionlarning membrana orqali harakati, potentsiallar farqi, depolyarizatsiya–repolarizatsiya jarayonlari va ion kanallarining faoliyatiga asoslanadi. Shu sababli EKG, EMG va EEG signallari organizmdagi

turli fiziologik jarayonlarni nisbatan arzon, invaziv bo'lmagan va yuqori diagnostik qiymatga ega usullar yordamida baholash imkonini beradi. Bu bo'limda miokardning elektr modeli, mushak to'qimalarining elektr faolligi va neyronlar tarmog'ining elektr dinamikasi fizika va biofizikaning asosiy qonuniyatlari orqali izchil yoritiladi.

EKG – miokard elektr modeli

Miokardning elektr modeli yurak mushak hujayralarining ritmik elektr faolligi, depolarizatsiya to'liqlinining yurak bo'ylab tarqalishi va uning tananing o'tkazuvchan muhitlaridan o'tish fizikasi bilan belgilanadi. Har bir yurak siklida sinoatriyal tugunda hosil bo'lgan elektr impulslar avval atriya bo'ylab, so'ngra atrioventrikulyar tugun orqali qorinchalarga uzatiladi. Bu jarayon davomida hujayra membranasi potentsiali Na^+ , Ca^{2+} va K^+ ionlarining tartibli oqimi natijasida o'zgaradi. Depolyarizatsiya – membrana ichki qismida musbat zaryadning ortishi – elektr to'liqlinini yuzaga keltiradi, repolyarizatsiya esa uni tiklaydi.

Miokardning elektr modeli murakkab vektorlar yig'indisidan tashkil topgan bo'lib, yurakning har bir segmenti o'z elektr dipolini hosil qiladi. Ushbu dipollar vektorial tarzda qo'shilganda ma'lum amplituda va yo'nalishga ega bo'lgan yurakning umumiy elektr vektori hosil bo'ladi. Aynan shu vektor tananing yuzasiga birlashtirilgan elektrodlar orqali qayd etiladigan EKG signallarining fizik poydevorini tashkil qiladi. Tana to'qimalarining elektr o'tkazuvchanligi, elektrod–teri interfeysining elektr qarshiligi, tanadagi suyuqliklarning ion tarkibi kabi omillar signallar amplitudasi va shakliga bevosita ta'sir ko'rsatadi.

EKGdagi P to'liqlin atriyalarning depolyarizatsiyasini, QRS kompleksi qorinchalarning depolyarizatsiyasini, T to'liqlin esa repolyarizatsiyani aks ettiradi. QRS kompleksining keskin o'zgarishi miokard tolalarida sinxron depolyarizatsiya jarayonining fizik tezligi va ion kanallarining o'tkazuvchanlik xususiyatlari bilan bog'liqdir. EKG signallarining fizik modeli yurakning uch o'lchamli elektr generatori sifatidagi tasviri, o'tkazuvchan muhitning elektr xossalari va

elektrodlarning joylashish geometriyasi bilan bog'liq bo'lib, ushbu model klinik tashxis qo'yishda asosiy ahamiyatga ega.

EMG – mushak elektr faolligi.

Mushak to'qimalarining elektr faolligi skelet mushaklari tolalari bo'ylab tarqaladigan aksiyaviy potentsiallarning yig'indisidan iborat bo'lib, EMG ushbu signallarni qayd etish orqali mushaklarning funksional faolligi va nerv-mushak uzatishtizimining holatini baholaydi. Mushak tolalari nerv impulsini qabul qilgan zahoti membranadagi ion kanallari ochilib, natijada tez depolyarizatsiya to'liqini hosil bo'ladi va bu to'liqin mushak tolasi bo'ylab tarqaladi. Har bir motor birlik – bir nerv tolasi va unga biriktirilgan mushak tolalari majmuasi – elektr faollikning mustaqil manbai hisoblanadi.

EMG signallarining fizik xususiyatlari mushak tolalarining uzunligi, ion kanallarining zichligi, membrana kapasitansi, mushakning anatomik qurilishi, faollashuv darajasi va elektrodlar joylashishiga bog'liq bo'ladi. Yuzaki EMG teriga joylashtirilgan elektrodlar yordamida yig'ma elektromiogrammani qayd etsa, iganali EMG mushak tolalari ichidagi elektr faollikni bevosita sezgir elektrodlar orqali qayd etadi. Mushak to'qimasining elektr qarshiligi va dielektrik xususiyatlari signallarni susaytiradi, shuning uchun mushak faoliyatining fizik modellari resistiv va kapasitativ komponentlarni hisobga oladi.

EMG signallari amplitudasi mushak tolalarining faollashuv darajasi bilan, chastota tarkibi esa mushakning fiziologik yuklanishi bilan bevosita bog'liqdir. Yuqori chastotali komponentlarning kamayishi mushak charchoqlarining fiziologik belgisi bo'lib, ion almashinuvining sekinlashuvi va membrana potentsialining tiklanish davrining uzayishi bilan izohlanadi.

EEG – neyron elektrik dinamikasi.

EEG miya po'stlog'ida joylashgan millionlab neyronlarning sinxron postsinaptik potentsiallari yig'indisini qayd qiladi. Neyronlarning elektr faoliyati aksiyaviy potentsiallar va sinaptik potentsiallar orqali amalga oshadi. Aksiyaviy

potensiallar juda qisqa davomli bo'lgani uchun bosh terisida qayd etishda ular sezilmaydi; EEG signallarining asosiy manbai lenta postsinaptik depolyarizatsiya va repolyarizatsiya to'liqlaridir.

Neyronlar populyatsiyasining elektr modeli membrananing kapasitans, rezistans, ion oqimlari dinamikasi va dendritlar orqali sig'imli o'zaro ta'sirlariga tayanadi. Miya to'qimalarining elektr o'tkazuvchanligi, bosh suyagining dielektrik xususiyatlari, miya suyuqligining ion tarkibi EEG signallarining tarqalish geometriyasiga ta'sir ko'rsatadi. Shuning uchun EEG signallari tananing elektr havo qatlamlari orqali filtrlanadi va keng chastota diapazoniga ega bo'ladi.

EEG ritmlari turli fiziologik holatlarni aks ettiradi:

- alfa ritm (8–13 Hz) dam olish holatini,
- beta ritm (14–30 Hz) faol kognitiv jarayonlarni,
- teta ritm (4–7 Hz) uyquga yaqin holatlarni,
- delta ritm (0.5–3 Hz) chuqur uyquni bildiradi.

Bu ritmlar neyronlarning katta tarmoqlarida paydo bo'ladigan elektr rezonanslari, ion oqimlarining sirkadiyal dinamikasi, sinaptik faollik va neyronlarning sinxronlashgan tebranishlari bilan bog'liqdir.

EEGning fizik modeli Poisson tenglamalari va elektr potensialning hajm bo'ylab tarqalish tenglamalariga tayanadi. Bu model bosh suyagi, miya suyuqligi va po'stloqning o'tkazuvchanlik farqlarini hisobga oladi. Aynan shuning uchun EEG signallarining amplitudasi past, chastota diapazoni esa kengdir.

EKG, EMG va EEG signallarini fizika nuqtai nazaridan tahlil qilish ularni diagnostik ahamiyatini oshiradi, biologik jarayonlarning asosiy mexanizmlarini o'rganish imkonini yaratadi va biotibbiyot muhandisligi uchun elektr modellarni ishlab chiqishning ilmiy platformasini tashkil etadi.

2.4. Ultratovush fizikasi.

Ultratovush fizikasi zamonaviy tibbiy diagnostika va terapiyaning eng asosiy poydevorlaridan biri bo'lib, yuqori chastotali mexanik to'liqlarning organizm

to'qimalari bilan o'zaro ta'siriga asoslanadi. Inson qulog'i eshitish diapazoni taxminan 20 Gs dan 20 kGs gacha bo'lgan bo'lsa, ultratovush chastotalari odatda 20 kGs dan yuqoriga, tibbiy amaliyotda esa asosan 1–20 mGs diapazoniga to'g'ri keladi. Ultratovush to'liqlarining fizik tabiati, ularning tarqalish tezligi, so'nishi, akslanishi, sindirilishi, difraksiyasi va Doppler effektiga asoslangan chastota siljishlari tibbiy tasvirlashning sifatini belgilaydi. Shuning uchun ultratovush fizikasi to'liqlar nazariyasi, elastik muhitlarda tebranishlar, akustik impedans, energiya o'tkazuvchanligi, rezonans hodisalari va sezgir detektorlarning fizik xususiyatlarini chuqur o'rganishni talab qiladi.

Ultratovush to'liqlari elastik muhitlarda uzunlamas tebranishlar ko'rinishida tarqaladi. Ularning tezligi muhitning zichligi va elastiklik moduliga bog'liq bo'lib, ko'p hollarda quyidagi tenglama bilan ifodalanadi: $v = \sqrt{E / \rho}$, bu yerda v – to'liq tezligi, E – moddaning elastiklik moduli, ρ – uning zichligidir. Inson tanasida ultratovushning tarqalish tezligi turli to'qimalarda farq qiladi: masalan, mushaklarda va parenximatoz organlarda taxminan 1540 m/s, yog' to'qimalarida taxminan 1450 m/s, suyaklarda esa 3000–4000 m/s gacha bo'ladi. Bu farqlar tasvirning aniqligi, chegaralar kontrasti va signalning qaytish vaqtini hisoblashda muhim ahamiyat kasb etadi.

Ultratovush diagnostikasining asosiy fizik parametrlari to'liqlarning so'nishi, akslanishi va o'tishi bilan belgilanadi. So'nish jarayoniga yutilish (issiq energiyaga aylanish) va sochilish (molekulalar va mikroskopik strukturalar bilan to'qnashuv) sabab bo'ladi. So'nish koeffitsienti chastota oshgani sari kuchayadi, shu sababdan yuqori chastotali ultratovush yuqoriroq aniqlik beradi, ammo tanaga chuqur kirib bormaydi. Past chastotali ultratovush esa chuqurroq penetratsiya qiladi, ammo tasvirlar yirikroq va kam aniqlikka ega bo'ladi.

Akslanish hodisasi ultratovush tasvirining asosiy mexanizmlaridan biri bo'lib, u to'qimalarning akustik impedans farqi tufayli yuzaga keladi. Akustik impedans $Z = \rho v$ formulasi bilan aniqlanadi va to'qimalar chegaralarida aks etgan to'liqlar

kuchi aynan shu farqqa bog'liq bo'ladi. Parenximatoz organlar bilan suyuqlik o'rtasidagi impedans farqi kichik bo'lgani uchun akslanish kam bo'ladi, ammo organ–havo yoki organ–suyak chegaralarida akslanish juda yuqori bo'ladi. Shu sababli o'pka yoki ichakdagi havo ultratovush tasvirini jiddiy buzishi mumkin.

Ultratovushning yana bir muhim fizik xususiyati sochilish bo'lib, u mikroskopik tarkibga ega to'qimalarda, masalan, parenximatoz organlarda ko'proq kuzatiladi. Sochilish tufayli hosil bo'ladigan noaniq tarqalgan aks signallari tasvirning teksturasini shakllantiradi. Ultrasonografiyada to'qimalarning parenximasida ko'rinadigan donador ko'rinish aynan shu fizik jarayon bilan izohlanadi.

Ultratovush diagnostikasining eng muhim tamoyillaridan biri – pulsed-echo mexanizmi bo'lib, bunda transduser ultratovush impulsini organlarga yo'naltiradi va to'qimalardan qaytgan aks signallarini qayd etadi. Ushbu signallar vaqt bo'yicha o'lchanib, ularning qaytish muddati masofaga, intensivligi esa to'qima chegaralarining fizik xususiyatlariga bog'liq holda tasvirga aylantiriladi. Bu jarayon real vaqt rejimida amalga oshirilishi sababli ultratovush – homilani kuzatishdan tortib yurakning dinamik faoliyatigacha bo'lgan barcha jarayonlarni kuzatishda eng qulay diagnostik usulga aylandi.

Ultratovush fizikasi Doppler effektini ham o'z ichiga oladi. Doppler ultratovush qon oqimining tezligi va yo'nalishini aniqlashda ishlatiladi va qon tomirlaridagi dinamik o'zgarishlarni baholashda fundamental ahamiyatga ega. To'lqinlar eritrotsitlarga urilib qaytganda chastota siljishi sodir bo'ladi, bu siljish to'lqin generatori va dispersiv muhitning nisbiy harakatiga bog'liq. Doppler ultratovush arterial stenozlar, tromboz, yurak klapanlari yetishmovchiligi va mikrotsirkulyatsiya buzilishlarining diagnostikasida keng qo'llanadi.

Ultratovush fizikasi tibbiy terapiya sohasida ham muhim o'rin tutadi. Yuqori intensivlikdagi fokuslangan ultratovush (HIFU) energiyani ma'lum nuqtaga jamlab, to'qimalarni koagulyatsiya qilish yoki ablatsiya qilish imkonini yaratadi. Bu texnologiya onkologiyada o'smalarni yo'q qilish, ginekologiyada submukozal

fibromalarni davolash, urologiyada prostata to'qimasiga ta'sir qilish kabi ko'plab amaliyotlarda qo'llaniladi. Terapevtik ultratovushning fizik tamoyillari to'qimalarning issiqlik xususiyatlari, energiya yutilishi, to'liqlarning fokuslanish intensivligi va to'qimaning issiqlik diffuziyasiga asoslanadi.

Shuningdek, past intensivlikdagi ultratovush regeneratsiya jarayonlarini faollashtirish, suyak sinishlarini tezroq bitishini rag'batlantirish, yallig'lanishni kamaytirish, to'qimalarda mikrosirkulyatsiyani yaxshilash kabi terapevtik maqsadlarda qo'llaniladi. Bu jarayonlarda ultratovush mexanik vibromassaj, kavitatsiya va mikrostruktural yangilanish mexanizmlariga asoslanadi.

Ultratovush fizikasi transduserlar texnologiyasini ham o'z ichiga oladi. Piezoelektrik kristallar mexanik tebranishni elektr maydoniga yoki aksincha elektr maydonini mexanik tebranishga aylantiradi. Shu sababli ultratovush zondlari tibbiy qurilmalarning eng muhim komponenti bo'lib, ularning chastota diapazoni, impuls davomiyligi, o'lchami va geometriyasi tasvir sifati va penetratsiya chuqurligini belgilaydi.

Shunday qilib, ultratovush fizikasi tibbiy diagnostika va terapiyaning ilmiy asoslarini tashkil etib, inson to'qimalarining elastik xususiyatlari, akustik impedanslari, to'liqlar tarqalish tezligi, akslanish koeffitsientlari, Doppler o'lchovlari va energiya yutilish jarayonlarining fizik tabiatini chuqur tahlil qiladi. Ushbu texnologiyaning yuqori aniqligi, xavfsizligi, invaziv bo'lmaganligi va real vaqt rejimida ishlash imkoniyati uni zamonaviy tibbiyotning ajralmas qismiga aylantirgan.

2.4.1. Piezoelektrik effekt. Doppler effekti. Akustik impedans modellashtirish.

Ultratovush tizimlarining fizik asoslarini tashkil etuvchi piezoelektrik effekt, Doppler siljishi va akustik impedans modellarini chuqur tushunish diagnostik qurilmalar konstruktsiyasini loyihalash, ularning ishlash mexanizmlarini optimallashtirish va tibbiy tasvirlarning aniqligini oshirish uchun muhim

ahamiyatga ega. Mazkur uchlik – akustik to‘lqin hosil bo‘lishi, to‘lqinlarning harakatlanuvchi muhit bilan o‘zaro ta’siri va to‘lqinlarning to‘qima chegaralaridagi fizik o‘zgarishlari – ultrasonografiyaning to‘liq ilmiy platformasini tashkil etadi.

Piezoelektrik effekt

Piezoelektrik effekt ultratovush transduserlarining bosh mexanizmi bo‘lib, mexanik bosimning o‘zgarishi va elektr maydoni o‘rtasidagi ikki tomonlama konversiyani anglatadi. Ushbu hodisa Kristallar ichida zaryad markazlarining assimetrik joylashishi tufayli yuzaga keladi. Shunday kristalllarga kvars, bariy titanati, qo‘rg‘oshin-zirkonat-titanat (PZT) va zamonaviy kompozit piezoelektrik materiallar kiradi.

Piezoelektrik effekt ikki ko‘rinishda namoyon bo‘ladi:

1. To‘g‘ri piezoelektrik effekt

Kristalga mexanik bosim yoki deformatsiya ta’sir etganda kristall panjarasining dipol momentlari o‘zgaradi va kristallning qarshi yuzalarida elektr zaryadlar paydo bo‘ladi. Bu jarayon ultratovush signallarining qabul qilinish jarayonida ishlaydi. To‘qimalardan qaytgan ultratovush to‘lqinlari kristallni tebratib, unda kuchlanish hosil qiladi, bu esa elektr impuls sifatida tizimga uzatiladi.

2. Teskari piezoelektrik effekt

Elektr maydoni kristallga qo‘llanganda uning panjarasi deformatsiyalanadi va kristall mexanik tebranishlar hosil qiladi. Ultrasonografiya generatori transduserga elektr impuls yuborganida aynan shu mexanizm ishga tushadi va kristall tomonidan ultratovush to‘lqini hosil qilinadi.

Piezoelektrik kristallning tebranish chastotasi uning qalinligiga bog‘liq bo‘lib, quyidagi munosabat bilan ifodalanadi:

$$f = v / (2d)$$

bu yerda f – ultratovush chastotasi, v – kristal ichidagi tovush tezligi, d – piezoelektrik plastinkaning qalinligi.

Tibbiyotda odatda 2–15 MHz diapazonidagi transduserlar ishlatiladi. Past chastotali (2–5 MHz) to‘lqinlar chuqur kiradi, yuqori chastotali (7–15 MHz) to‘lqinlar esa yuqori aniqlik beradi, ammo chuqurlik kam.

Piezoelektrik effekt ultratovush tizimlarining aniqligi, sezgirligi, impuls davomiyligi, signalning amplitudasi va inson organizmi bilan o‘zaro ta’sirning sifatini belgilaydi. Shuning uchun real klinik qurilmalarda piezoelektrik kristallar maxsus amortizatsiya qatlamlari, matching layer va akustik linzalar bilan birgalikda ishlatiladi.

Doppler effekti

Doppler effekti harakatdagi obyektlar tomonidan qaytarilgan to‘lqin chastotasining o‘zgarishi bo‘lib, ultratovush diagnostikasida qon oqimi tezligini va yo‘nalishini aniqlashning asosiy mexanizmi hisoblanadi. Eritrotsitlar harakatlanayotganda ularga yo‘naltirilgan ultratovush to‘lqini qaytadi va olingan to‘lqinning chastotasi boshlang‘ich chastotadan farq qiladi.

Doppler chastota siljishi quyidagi munosabat bilan ifodalanadi:

$$\Delta f = (2v f_0 \cos\theta) / c$$

Bu yerda:

- Δf – qaytgan signalning chastota siljishi,
- v – qon oqimining tezligi,
- f_0 – yuborilgan ultratovush chastotasi,
- θ – ultratovush nuri bilan qon oqimi o‘qi orasidagi burchak,
- c – to‘qimadagi tovush tezligi (≈ 1540 m/s).

Doppler effektining fizik mohiyati shundan iboratki, eritrotsitlar ultratovush to‘lqinlari uchun kichik harakatlanuvchi tarqatuvchilar rolini bajaradi va aks to‘lqin chastotasiga ularning nisbiy tezligi ta’sir qiladi.

Doppler ultratovush turlari:

- **Pulsed Doppler:** lokal tezlikni o‘lchashga imkon beradi, lekin Nyquist cheklovi mavjud.

- **Continuous-wave Doppler:** yuqori tezliklarni o'ldaydi.
- **Rangli Doppler (Color Doppler):** qon oqimi yo'nalishi va tezligini ranglar bilan tasvirlaydi.
- **Energiya Doppleri (Power Doppler):** past tezlikdagi oqimlarni sezgir aniqlaydi.

Doppler effekti klinik amaliyotda arterial stenozlar, venoz tromboz, yurak klapanlari yetishmovchiligi, fetal qon aylanishi, tomir elastikligi va periferik mikrotsirkulyatsiya haqida muhim fiziologik ma'lumot beradi.

Akustik impedans modellashtirish

Akustik impedans biologik to'qimalarning ultratovush to'liqlariga ko'rsatadigan qarshiligini ifodalaydi va u $Z = \rho v$ formulasi bilan aniqlanadi:

$$Z = \rho v$$

bu yerda ρ – to'qima zichligi, v – ushbu to'qimada ultratovush tarqalish tezligidir.

To'qimalar chegarasida ultratovushning akslanishi aynan akustik impedansning farqi bilan belgilanadi. Akslanish koeffitsienti R quyidagicha:

$$R = ((Z_2 - Z_1) / (Z_2 + Z_1))^2$$

Bu formula orqali to'qimalar o'rtasidagi kontrast fizik modellashtiriladi. Agar Z farqi katta bo'lsa (masalan, to'qima–havo), akslanish kuchli bo'ladi va tasvir buziladi. Agar impedanslar bir-biriga yaqin bo'lsa, akslanish kam bo'ladi va yuqori sifatli penetratsiya sodir bo'ladi.

Akustik impedans modellashtirish tibbiy tasvirlashda quyidagilarni belgilaydi:

1. **To'qimalarning chegaralarini aniqlash** – masalan, jigar–buyrak yoki o'smalar chegarasi.
2. **Tasvir kontrasti** – impedans farqi katta bo'lsa, chegaralar aniq ko'rinadi.
3. **Transduser dizayni** – matching layer materiali impedansni moslashtirish orqali energiya yo'qotilishini kamaytiradi.

4. **Tovushning tanaga kirish samaradorligi** – gel ishlatilishi havo qatlamini yo‘qotib, impedans mosligini oshiradi.

5. **Suyak va havo sababli artefaktlar** – impedansning o‘ta katta farqi tasvirni butunlay to‘xtatadi.

Model yaratishda to‘qimalarning real fizik parametrlari (ρ va v) olinib, to‘lqinlarning akslanish/so‘nish xususiyatlari 2D va 3D fazoviy algoritmlar orqali matematik (masalan, ray-tracing yoki finite-element method) modellashiriladi.

Piezoelektrik effekt ultratovushning hosil bo‘lishi va qabul qilinishini ta’minlaydi; Doppler effekti to‘qimalar ichidagi harakatni aniqlash imkonini beradi; akustik impedans modellashirish esa to‘lqinlarning to‘qimalar bilan o‘zaro ta’siri va tasvir sifatini belgilab beradi. Ushbu uchlik ultratovush texnologiyalarining fizik poydevorini tashkil etib, yuqori aniqlikdagi diagnostikaning ilmiy asosini yaratadi.

III-BOB. TIBBIY QURILMALARDA FIZIK QONUNLARNING INTEGRATSIYASI.

3.1. Diagnostik qurilmalar fizikasi.

Diagnostik qurilmalar fizikasi zamonaviy tibbiy texnologiyaning asosiy poydevorini tashkil etib, tibbiyotda qo‘llaniladigan barcha diagnostik asboblarning ishlash mexanizmini, energiya manbalarining tabiatini, signallarni hosil bo‘lishi va ularni qayta ishlash jarayonlarini chuqur ilmiy asosda tushuntiradi. Diagnostik qurilmalar turli fizik tamoyillarga – elektromagnit to‘lqinlarning tarqalishi, mexanik to‘lqinlarning o‘zaro ta’siri, ionlashtiruvchi nurlanishning modda bilan o‘zaro aloqasi, elektr qarshilik va impedans o‘zgarishlari, optik hodisalar, magnit maydonlar dinamikasi va kvant energetika prinsiplariga asoslanadi. Har bir diagnostik usul ma’lum fizik qonuniyatning amaliy ko‘rinishidir va shu sababli diagnostik qurilmalarni to‘g‘ri loyihalash, kalibrlash va klinik amaliyotda xavfsiz qo‘llash uchun ushbu tamoyillarni chuqur o‘rganish zarur.

Diagnostic qurilmalar fizikasi avvalo signallarni hosil qiluvchi energiya manbalarini tahlil qilishdan boshlanadi. Masalan, ultratovush qurilmalari piezoelektrik effektga asoslanib yuqori chastotali mexanik tebranishlarni hosil qilsa, elektromagnit diagnostikada radiochastota, mikroto'ldin yoki infraqizil nurlar to'ldimlarning dielektrik va yutilish xususiyatlariga qarab tarqaladi. Ionlashtiruvchi nurlanishga asoslangan rentgen, kompyuter tomografiyasi va yadro tibbiyoti texnologiyalari modda ichida fotoeffekt, Kompton sochilishi va juftlik hosil bo'lish kabi jarayonlarning fizik mohiyatidan foydalanadi. Optik diagnostika esa yorug'likning yutilish, akslanish, sochilish, interferensiya va difraksiya mexanizmlariga tayanadi.

Diagnostic qurilmalar fizikasi nafaqat signalning yaratilishini, balki uning organizm to'ldimlari bilan o'zaro ta'sirini ham matematik model orqali tahlil qiladi. Masalan, ultratovush to'ldimlarining tanada tarqalishi elastik muhit tebranishlari tenglamalari orqali ifodalanib, to'ldimlarning so'nishi, akslanishi, difraksiyasi va Doppler chastota siljishlari akustik impedans modellariga bog'liq. Rentgen nurlari organizmda yutilganda ularning intensivligi Beer–Lambert qonuniga asosan eksponentsial ravishda kamayadi, bu esa tasvir kontrastining asosiy omillaridan biriga aylanadi. Optik signallar tarqalishi Mie va Reyli sochilish nazariyalari, interferensiya hodisalari va spektral yutilish chiziqlari yordamida modellashtiriladi. Bularning barchasi diagnostic qurilmalarning fizik poydevorlarini aniqlaydi.

Diagnostic texnologiyalarda detektorlar fizikasi alohida o'rin tutadi. Detektorlar energiyaning bir turdagi shaklini boshqa shaklga aylantiradi va shu orqali signallarni elektr impuls sifatida ro'yxatga olish imkonini yaratadi. Ionlashtiruvchi nurlarni qayd etuvchi detektorlar (scintillyatorlar, fotoko'paytirgichlar, yarimo'tkazgich detektorlari) energiyaning fotoelektrik o'tishiga asoslanadi. Ultrasonografiya detektorlari piezoelektrik kristallning mexanik tebranishini elektr signalga aylantiradi. Optik diagnostikada fotodiodlar, CCD va CMOS sensorlar

foton oqimini elektron oqimiga konvertatsiya qiladi. Har bir detektorning sezgirligi, shovqin darajasi, dinamik diapazoni va vaqt rezolyutsiyasi tasvirning sifatini belgilovchi muhim fizik parametrlar hisoblanadi.

Diagnostic qurilmalarning fizikasi signalni qayta ishlash algoritmlarini ham o'z ichiga oladi. Tasvirni shakllantirish jarayonida qaytarilgan yoki o'lchangan signallar matematik filtrlar, Fourier tahlili, konvolyutsiya operatsiyalari, rekonstruksiya algoritmlari va signallarni kuchaytiruvchi protsessorlarga uzatiladi. Masalan, kompyuter tomografiyasida tasvir hosil bo'lishi filtrlangan qaytar proyeksiyalar algoritmiga asoslanadi, magnit-rezonans tomografiyada esa to'liq tasvir Fourier transformatsiyasi orqali kvaziharmonik chastota komponentlari asosida tiklanadi. Ultrasonografiyada esa vaqt–amplituda signalidan B-rejimli tasvirni yaratish uchun real vaqtli beamforming algoritmlari qo'llaniladi.

Diagnostic qurilmalar fizikasi xavfsizlik tamoyillarini ham qamrab oladi. Ionlashtiruvchi nurlanish bilan ishlovchi qurilmalarda doza yukini minimumga tushirish, bemor va operatorni radiatsiya ta'siridan himoya qilish, o'lchovlarning aniqligini ta'minlash uchun davlat va xalqaro standartlar mavjud. Ultrasonografiyada issiqlik indeksi va mexanik indeks kabi fizik parametrlar to'qimalarda haddan tashqari qizish yoki kavitatsiya xavfini baholashda qo'llaniladi. Optik diagnostikada esa lazerlarning quvvat zichligi, to'lqin uzunligi, puls davomiyligi va lazer–to'qima o'zaro ta'sir mexanizmi fizik jihatdan nazorat qilinadi.

Diagnostic qurilmalar fizikasi signal–shovqin nisbatini oshirish, detektorlarning sezgirligini optimallashtirish, energiya uzatish samaradorligini yaxshilash va artefaktlarni kamaytirish uchun ham muhim ahamiyatga ega. Masalan, magnit-rezonans tomografiyada gradient maydonlarining linearligi, radiochastota impulslarining bir xil tarqalishi, shovqinlarni kamaytiruvchi filtrlarning samaradorligi tasvir sifatini sezilarli darajada oshiradi. Rentgen tizimlarida esa nurlanishni kollimatsiya qilish, siqilish filtrlarini qo'llash va detektorlarning kvant

samaradorligini oshirish kontrastni yaxshilaydi. Ultrasonografiyada piezoelektrik kristallning rezonans chastotasini to'g'ri tanlash, matching layer dizayni va beamforming algoritmlarining optimallashtirilishi tasvirning rezolyutsiyasiga bevosita ta'sir ko'rsatadi.

Shunday qilib, diagnostik qurilmalar fizikasi tibbiy texnologiyalarning ilmiy asoslarini tashkil etib, energiya manbalarining tabiatidan boshlab, signallar hosil bo'lishi, ularning organizm to'qimalari bilan o'zaro ta'siri, qayta ishlanishi, tasvirga aylantirilishi va klinik xavfsizligini qamrab oladi. Ushbu fizika tibbiy diagnostika apparatlarini yaratish, modernizatsiya qilish va klinik amaliyotda samarali qo'llashning poydevori sifatida biotibbiyot muhandisligining eng muhim bo'limlaridan biridir.

3.1.1. MRI fizikasi (NMR, rezonans, gradientlar). KT fizikasi (rentgen yutilish koeffitsienti). PET fizikasi (pozitron-annigilyatsiya modeli).

Zamonaviy tibbiy diagnostikaning eng yuqori texnologik yutuqlaridan biri magnit-rezonans tomografiya (MRI), kompyuter tomografiya (KT) va pozitron-emissiya tomografiyasi (PET) bo'lib, ular organizmning strukturaviy va funksional holatini turli fizik energiyalar orqali tasvirlashga asoslanadi. Ushbu tizimlarning poydevorida elektromagnit nurlanish, ionlashtiruvchi nurlanish, radiochastotali maydonlar, yadro magnit momentlari, annihilyatsiya jarayoni va rentgen yutilish koeffitsientlarining fizik modellari yotadi. Har bir texnologiya inson tanasida sodir bo'ladigan fizik jarayonning o'ziga xos xususiyatlarini matematik tarzda tahlil qiladi va diagnostik ma'lumotlarni tasvir shakliga keltiradi.

MRI fizikasi: NMR, rezonans va gradientlar

Magnit-rezonans tomografiya yadro magnit rezonansi (NMR) tamoyillariga asoslanadi. Inson organizmidagi vodorod yadrolari (protonlar) o'ziga xos magnit momentga ega bo'lib, kuchli tashqi magnit maydoniga joylashtirilganda ular maydon bo'ylab yo'nalgan tartibli holatga kiradi. Bu jarayon spinlarning parallellashtirilishi va umumiy magnitlanish vektori hosil bo'lishi bilan bog'liq.

Tashqi magnit maydoni B_0 protonlarning pretsessiya chastotasini (Larmor chastotasi) aniqlaydi:

$$\omega = \gamma B_0$$

bu yerda γ – giromagnit koeffitsient, B_0 – tashqi magnit induksiyaasidir.

Protonlar aynan shu chastotada tebranayotgani uchun ularga radiochastotali energiya berilganda rezonans hodisasi sodir bo'ladi. Rezonans protonlarning energiya holatini o'zgartirib, spin sistemani qo'zg'atilgan holatga o'tkazadi. Radiochastota impuls tugashi bilan protonlar asta-sekin tashqi magnit maydoni bilan muvofiqlashgan holatga qaytadi, bu jarayon T_1 va T_2 relaksatsiya vaqtlarini yuzaga keltiradi.

T_1 relaksatsiya – energiyani muhitga qaytishi.

T_2 relaksatsiya – spinlar fazasining tarqalib ketishi.

MRI tasviri aynan shu relaksatsiya vaqtlarining to'qimalar bo'yicha farqlanishi tufayli hosil bo'ladi.

MRI ning yana bir muhim qismi – **gradient maydonlari** bo'lib, ular magnit maydonning fazoviy o'zgarishiga sabab bo'ladi va protonlar pretsessiya chastotasining joyga bog'liq tarzda farqlanishini ta'minlaydi. Gradientlar uch o'lchamli koordinatalarda (x, y, z) qo'llanadi, bu esa bir bo'lakning qayerdan kelayotganini aniqlab beruvchi kodlash mexanizmini yaratadi.

MRI tasvir hosil bo'lishi quyidagi asosiy fizika bosqichlaridan iborat:

1. Protonlarning magnit maydon bilan tartiblanishi
2. Radiochastotali qo'zg'alish
3. Fazoviy gradientlar yordamida signalni kodlash
4. Qaytgan elektromagnit signalni qabul qilish
5. Fourier transformatsiyasi orqali tasvirni tiklash

KT fizikasi: rentgen yutilish koeffitsienti

Kompyuter tomografiya rentgen nurlarining inson tanasi orqali o'tishi jarayonida sodir bo'ladigan yutilish va sochilish xususiyatlariga asoslanadi. Rentgen nurlari

energiyasi 30–150 keV oralig‘ida bo‘lib, modda bilan o‘zaro ta’siri quyidagi fizik jarayonlarni keltirib chiqaradi:

- fotoeffekt
- Kompton sochilishi
- Rayleigh sochilishi

Rentgen nurlarining modda ichida susayishi Beer–Lambert qonuni bilan aniqlanadi:

$$I = I_0 e^{(-\mu x)}$$

bu yerda μ – moddaning yutilish koeffitsienti bo‘lib, u zichlik, atom raqami va energiyaga bog‘liqdir.

KT tasvirining fizik ko‘rinishi ana shu μ koeffitsientlarining turli to‘qimalarda farqlanishiga asoslanadi. Suv uchun μ standart qabul qilingan bo‘lib, boshqa to‘qimalarning yutilish koeffitsienti shu nuqtaga nisbatan Hounsfield birliklar (HU) da ifodalanadi:

$$HU = 1000 * (\mu_{\text{tissue}} - \mu_{\text{water}}) / \mu_{\text{water}}$$

Masalan:

- havo: –1000 HU
- yog‘: –100 HU
- mushak: +40 HU
- suyak: +1000 HU gacha

KT fizikasi rentgen nurlanishining turli burchaklardan tanaga yuborilishi, detektorlarda qayta ro‘yxatga olinishi va matematik rekonstruksiya (filtrlangan qaytar proyeksiyalar algoritmi) orqali tasvirga aylantirilishidir.

PET fizikasi: pozitron-annihilyatsiya modeli

Pozitron-emissiya tomografiya (PET) metabolik jarayonlarni tasvirlash imkonini beruvchi yadro fizikasi tamoyillariga asoslanadi. PET ning fizik poydevori radioaktiv izotoplar (^{18}F , ^{11}C , ^{15}O) tomonidan chiqariladigan **pozitronlarning**

moddiy elektronlar bilan to‘qnashganda annihilyatsiya jarayonini yuzaga keltirishdir.

Pozitron to‘qima ichida bir necha millimetr harakatlengach, elektron bilan uchrashadi va ular bir-birini yo‘q qiladi; natijada ikki dona 511 keV energiyaga ega gamma kvant qarama-qarshi yo‘nalishda (180° farq bilan) tarqaladi.

PET detektorlarida ushbu ikki gamma kvantning **bir vaqtning o‘zida** qayd etilishi (coincidence detection) kuzatiladi. Bu jarayon annihilyatsiya nuqtasining bir o‘qqa tushishini aniqlash imkonini beradi. Ko‘plab gamma juftliklari ro‘yxatga olingach, matematik rekonstruksiya yordamida 3D metabolik xarita tuziladi.

PETning fizik modellarida quyidagi jarayonlar tahlil qilinadi:

1. radioizotopning yarim emirilish davri
2. pozitronning to‘qima ichida harakati
3. annihilyatsiya jarayonining ehtimollik modeli
4. qo‘shaloq fotonlarni ro‘yxatga oluvchi detektorlarning kvant samaradorligi
5. rekonstruksiya algoritmlari (MLEM, OSEM)

PETning diagnostik ahamiyati shundaki, u strukturaviy emas, balki metabolik jarayonlarni aks ettiradi — o‘smalar, yallig‘lanish o‘choqlari, metabolik buzilishlar, neyrodegenerativ kasalliklar PET orqali aniqlanadi.

MRI, KT va PET texnologiyalarining fizikasi inson organizmidan olinadigan tasvirlarning butun ishlash mexanizmini belgilaydi. MRI atom yadrolarining magnit rezonansiga, KT rentgen nurlarining yutilish xususiyatlariga, PET esa pozitron-annihilyatsiya jarayoniga asoslanadi. Shu uchlik birgalikda zamonaviy radiologiyaning ilmiy poydevorini tashkil etadi va ularning chuqur fizik modellarini bilish biotibbiyot muhandisligi uchun fundamental ahamiyatga ega.

3.2. Biotibbiy sensorlar

Biotibbiy sensorlar zamonaviy diagnostika, monitoring va terapevtik tizimlarning eng muhim komponentlaridan biri bo‘lib, ular organizmning

fiziologik, biokimyoviy yoki fizik parametrlarini real vaqt rejimida aniqlash imkonini beruvchi yuqori sezgir, selektiv va barqaror deteksion tizimlar sifatida qaraladi. Sensorlarning ishlash mexanizmi signallarni hosil qiluvchi biofizik jarayonlar, ularning fizik transduksiyasi, o'lchash signallarining elektr yoki optik ko'rinishga aylantirilishi va nihoyat raqamli qayta ishlanishi jarayonlarini o'z ichiga oladi. Sensor tizimlari yordamida organizmdagi muhim jarayonlar – yurakning elektr faolligi, nafas chastotasi, qon bosimi, qon tarkibi, gazlar almashinuvi, glikemiya darajasi, pH balans, ion konsentratsiyalari, mushak faolligi, nevraviy impulslar va ko'plab metabolik jarayonlar nazorat qilinadi. Shunday qilib, biotibbiy sensorlar klinik tashxis, reanimatsiya monitoringi, telemeditsina, invaziv va nolovchil diagnostika, reabilitatsiya tizimlari va sun'iy a'zolar yaratishda ajralmas texnologiyadir.

Biotibbiy sensorlarning asosiy fizik mohiyati ularning tashqi yoki ichki biologik o'zgarishlarga nisbatan sezgir bo'lishi va bu o'zgarishlarni transduser yordamida o'lchab bo'ladigan signalga aylantira olishidir. Transduser – sensorning markaziy elementi bo'lib, fizik yoki kimyoviy o'zgarishni elektr signali, optik signal yoki mexanik javobga aylantiradi. Bu jarayon konduktivlik, potensial farqi, oqim zichligi, yorug'lik yutilishi, spektr o'zgarishi, mikromexanik deformatsiya, issiqlik o'zgarishi yoki elektromagnit induksiya kabi fundamental hodisalarga tayanadi.

Biotibbiy sensorlarni fizik asoslariga qarab bir nechta yirik guruhlariga ajratish mumkin. **Elektrokimyoviy sensorlar** – masalan, glyukoza sensorlari, qon gazlari analizatorlari – kimyoviy reaksiyalar natijasida hosil bo'lgan ion oqimlari yoki potensial farqini elektrodlar yordamida aniqlaydi. Bu sensorlar Nernst tenglamasi asosida ishlaydi va elektrod–elektrolit interfeysining elektrokimyoviy xossalariga bog'liq bo'ladi. **Oksimetriya sensorlari** optik tamoyillarga tayanib, gemoglobin fraksiyalarining yutilish spektrlarini o'lchash orqali kislorod saturatsiyasini aniqlaydi. Ushbu qurilmalar Beer–Lambert qonuni va optik spektral filtrlash mexanizmlariga asoslanadi. **Piezoelektrik va mikromexanik sensorlar** esa

biologik to'qimalardan kelib chiqadigan mexanik bosim yoki tebranishni piezoelektrik materiallarning deformatsiya–zaryad konversiyasi orqali qayd etadi.

Yana bir muhim guruh – **elektrofiziologik sensorlar** bo'lib, ular bioelektrik signallarni – EKG, EEG, EMG – sezgilaydigan elektrodlar tizimidan tashkil topadi. Bu sensorlarning ishlash mexanizmi hujayralar membranasi potensialining o'zgarishiga asoslangan bo'lib, elektrod–teri qarshiligi, o'tkazuvchan jelning mavjudligi, signal-shovqin nisbatining boshqarilishi va filtratsiya algoritmlarining to'g'ri tanlanishini talab qiladi. Elektrodning materiali ham muhim bo'lib, kumush-xlorid, oltin, platina yoki uglerod asosidagi materiallar yuqori sezgirlik va biokompatibilik beradi.

Optik sensorlar biotibbiyotda tobora keng qo'llanilmoqda. Ular organizmning optik xossalaridagi o'zgarishlarni – yutilish, akslanish, sochilish, fluoresensiya – qayd etadi. Bunday sensorlar yordamida qon glyukozasi, teri pigmentatsiyasi, qon oqimi, to'qimalarning metabolik holati va hatto hujayra ichidagi ionlarning konsentratsiyasi aniqlanishi mumkin. Optik tolali sensorlar minimal invazivlik bilan to'qima ichiga kiritilishi va lokal o'lchovlarni amalga oshirishi mumkin. Ularning fizik modeli yorug'likning dielektrik muhitlarda tarqalishi, refraksion indeksning o'zgarishlari va fotonlarning energiya spektriga tayanadi.

Nanotexnologiya asosidagi biotibbiy sensorlar ham zamonaviy diagnostikaning asosiy yo'nalishlaridan biridir. Nanokristallar, kvant nuqtalari va nanotubalar biologik molekulalar bilan o'zaro ta'sirlashib, juda kichik konsentratsiyadagi analitlarni ham aniqlash imkonini beradi. Bu sensorlarning fizik asosida kvant effektlari, energiya sathlarining diskretligi, tunnellanish hodisalari, sirt plasmon rezonansi va molekulyar bog'lanish dinamikasi yotadi.

Biotibbiy sensorlarning sezgirligini oshirish uchun signalni kuchaytirish va shovqinlarni minimallashtirish masalalari ham muhim. Sensorlarning chiqish signallari odatda juda kichik bo'ladi, shuning uchun ular yuqori aniqlikdagi past-shovqinli kuchaytirgichlar, analog-raqam konvertorlar, filtrlar va raqamli qayta

ishlash algoritmlari yordamida qayta ishlanadi. Shovqin manbalari – termik shovqin, elektrodning polaizatsiya shovqini, akustik shovqinlar, elektromagnit induksiya shovqinlar – maxsus konstruktiv yechimlar bilan bostiriladi.

Biotibbiy sensorlarning ishonchliligi va aniqligi ularning kalibrlanish darajasiga, barqarorligiga, biokompatibilik xususiyatlariga, biofouling (tana suyuqliklari ta'siri) ga chidamliligiga bog'liq. Shuning uchun elektron, optik va kimyoviy komponentlarning biomuhit bilan moslashuvi muhim masaladir. Zamonaviy sensorlar maxsus polimer qoplamalar, hidrogel interfeyslar, nanozarralar bilan qoplash yoki sirtini o'zgartirish texnologiyalari orqali uzluksiz ishlashga moslashtiriladi.

Biotibbiyotda sensorlar nafaqat diagnostik qurilmalarda, balki tansional monitoring tizimlarida – sun'iy yurak stimulyatorlari, insulin pompalar, ko'krak qafasiga o'rnatiladigan respirator sensorlar, invaziv arterial bosim datchiklari, oqim o'lchagichlar, intrakranial bosim sensori kabi hayotiy ahamiyatga ega asboblarda qo'llaniladi. Sensorlar jarrohlik robotlarida, protezlarda, reabilitatsiya apparatlarida va inson–mashina interfeyslarida ham tizimning markaziy elementlaridan biridir.

Shunday qilib, biotibbiy sensorlar biotibbiyot muhandisligining fundamental yo'nalishlaridan biri bo'lib, ularning fizik, kimyoviy, elektrofizik va optik tamoyillarini chuqur o'rganish, yuqori sezgirlikda, barqaror ishlaydigan va klinik xavfsizlik talablariga javob beradigan tizimlar yaratish uchun zarurdir.

3.2.1. Optik sensorlar. Bioimpedans sensorlar. Nanobiosensorlar

Biotibbiy diagnostikada sensor texnologiyalarining rivojlanishi organizmdagi fiziologik, biokimyoviy va mikrostrukturaviy jarayonlarni yuqori sezgirlik, selektivlik va real vaqt rejimida o'lchash imkoniyatini yaratdi. Optik sensorlar, bioimpedans sensorlar va nanobiosensorlar tibbiy texnologiyalarning uchta asosiy yo'nalishini tashkil etib, ularning ishlash mexanizmi fizik qonuniyatlarga – yorug'likning modda bilan o'zaro ta'siri, dielektrik

xususiyatlarning o'zgarishi, ion harakatlanish dinamikasi, kvant effektlari, sirt energiyasi o'zgarishlari va elektromagnit maydonlarga asoslangan. Ushbu sensorlarning har biri biotibbiyotda o'ziga xos afzalliklari, o'lchov diapazoni va klinik qo'llanish doirasiga ega bo'lib, zamonaviy diagnostikaning ajralmas qismi hisoblanadi.

Optik sensorlar

Optik sensorlar biotibbiyotda yorug'likning yutilishi, akslanishi, sochilishi, interferensiya yoki fluoresensiya xususiyatlaridagi o'zgarishlarni o'lchash orqali ma'lumot olishga asoslanadi. Optik sensorlarning ishlash mexanizmi elektromagnit nurlanishning to'qimalar, biomolekulalar yoki optik muhit bilan o'zaro ta'siriga asoslanadi. Sensor dizaynining markazida fotodiodlar, optik tolalar, spektrometr elementlari yoki lazer nurlari bilan ishlaydigan detektorlar joylashadi.

Optik sensorlarda Beer–Lambert qonuni muhim fizik tamoyil bo'lib, u yorug'likning yutilish darajasi analit konsentratsiyasi bilan proporsional ekanini ifodalaydi. Shuningdek, polarizatsiya, interferensiya va spektral o'tishlar yordamida ham sezgirlik oshiriladi. Optik tolali sensorlar yorug'likning refraksion indeksga bog'liq o'zgarishlarini aniqlay olishi sababli invaziv bo'lmagan o'lchovlarda, masalan arterial kislorod darajasini aniqlash, qon oqimini kuzatish, metabolik jarayonlarni baholash kabi diagnostiklarga keng tatbiq etiladi.

Pulsoksimetriya optik sensorlarning eng keng tarqalgan amaliy yo'nalishlaridan biri bo'lib, unda qizil va infraqizil to'lqin uzunliklari gemoglobinning kislorodga bog'langan va bog'lanmagan shakllari tomonidan turlicha yutilishi fizik asos sifatida qo'llaniladi. Bu texnologiya Beer–Lambert qonuni, spektral filtrlash va to'lqin uzunligiga bog'liq modulyatsiya tamoyillariga tayangan.

Optik sensorlarning yuqori sezgirlikka ega bo'lgan yana bir turi – interferometrik optik sensorlar bo'lib, ular ikki nur orasidagi optik faza farqining o'zgarishi orqali o'lchovlarni amalga oshiradi. Bu yondashuv tiniq muhitlarda molekulyar o'zgarishlar, hujayralararo suyuqlik tarkibi, refraksion indeksdagi

mikroo'zgarishlarni aniqlash imkonini beradi. Fluoresensiya asosidagi sensorlar esa biomarkerlar, harorat o'zgarishi, kislota–asos holati va ion konsentratsiyasidagi o'zgarishlarni aniqlaydi.

Bioimpedans sensorlar.

Bioimpedans sensorlar tirik to'qimalarning elektr xususiyatlarini – rezistivlik, kapasitans, dielektrik xususiyatlar – o'lchashga asoslangan bo'lib, ular organizmdagi suyuqlik miqdori, elektrolitlar muvozanati, hujayralararo muhit strukturasidagi o'zgarishlar, membrana yaxlitligi va metabolik jarayonlarni baholashda katta klinik ahamiyatga ega. Bioimpedans sensori orqali organizmdan o'tkazilgan past kuchlanishli elektr oqimining qarshilikka duch kelishi o'lchanadi va to'qimalarning fizik xususiyatlari aniqlanadi.

Bioimpedansning fizik modeli tananing elektr ekvivalent sxemasi bilan izohlanadi. Hujayra membranasi kondensator sifatida, hujayra ichi suyuqligi rezistor sifatida, hujayralararo suyuqlik yana rezistor sifatida tasvirlanadi. Bu R–C modellar turli chastotalarda turlicha impedans ko'rsatadi. Masalan:

- past chastotada tok asosan hujayralararo suyuqlikdan o'tadi (membrana qarshiligi katta),
- yuqori chastotada esa tok membranadan ham o'tib, hujayra ichiga kiradi.

Shu sababli ko'p chastotali bioimpedans o'lchovlari organizmdagi suv miqdori, yog' massasi, mushak massasi, shishlar, yallig'lanish jarayonlari, dehidratatsiya holatlari haqida aniq ma'lumot beradi.

Bioimpedans sensorlar EKG elektrodlariga o'xshash kontaktlar orqali ishlaydi, ammo ular statik potensialni emas, o'zgaruvchan tok ta'siridagi kompleks impedansni qayd qiladi. To'qimalarning impedansi elektr maydonining tarqalishi, ionlarning harakatlanishi, membrana kapasitansi, suyuqlikning o'tkazuvchanligi kabi biofizik parametrlarga bog'liq.

Bioimpedans sensorlari quyidagi tibbiy yo'nalishlarda keng qo'llaniladi:

- yurak yetishmovchiligida suyuqlik yig'ilishini monitoring qilish

- buyrak kasalliklarida organizmning gidratatsiya holatini baholash
- ventilyatsiyani kuzatishda elektr impedans tomografiyasi yordamida o'pkadagi havoning taqsimlanishini aniqlash
- ortiqcha vazn tashxisida tana tarkibini aniqlash
- reanimatsiyada perfuziya o'zgarishlarini baholash

Bioimpedans sensorlarning ishonchliligi elektrod–teri interfeysining qarshiligi, chastota diapazoni, signal-shovqin nisbati va kuchaytirgichlarning aniqligiga bog'liq. Shuning uchun bunday sensorlar yuqori sezgir analog front-end sxemalari bilan birgalikda ishlaydi.

Nanobiosensorlar.

Nanobiosensorlar nanotexnologiya yutuqlariga asoslangan bo'lib, o'zining molekulyar va kvant o'lchamdagi sezgirligi bilan klassik sensorlardan keskin farq qiladi. Bu sensorlar nanometr darajadagi materiallar – nanotubalar, kvant nuqtalari, nanoo'lchamli metal zarralar, grafen strukturalari, nanoporli membranalar – yordamida juda kichik konsentratsiyadagi biomarkerlarni sezadi. Ularning ishlash mexanizmi quantum confinement, sirt plasmon rezonansi, tunnellanish, nanomekanik rezonanslar, sirt energiyasi o'zgarishi va ligand–retseptor bog'lanishi kabi fizik jarayonlarga asoslanadi.

Nanobiosensorlarning asosiy afzalliklari quyidagilardir:

- picomol darajadagi analitlarni aniqlay oladi
- o'lchov javobi juda tez
- minimal biomaterial talab qiladi
- yuqori selektivligiga ega

Sirt plasmon rezonansiga asoslangan nanobiosensorlar metall nanozarrachalar (oltin, kumush) yuzasida elektronlarning kollektiv tebranishi tufayli hosil bo'ladigan rezonans chastotasining o'zgarishini qayd etadi. Bunda nanozarralarning yuzasi biomolekulalar bilan bog'langanda refraksion indeks

o'zgaradi va rezonans chizig'i siljiydi – bu fizik jarayon molekulyar identifikatsiya uchun juda sezgir bo'ladi.

Qaytuvchi tok transistori asosidagi grafen sensorlar (GFET) ionlarning yoki biomolekulalarning grafen yuzasiga bog'lanishi natijasida grafenning elektr o'tkazuvchanligi o'zgarishiga asoslanadi. Bu sensorlar viruslar, oqsillar, DNK molekulalari va metabolitlarni aniqlashda qo'llaniladi.

Nanomekanik kantiliver sensorlar molekulyar bog'lanish tufayli nanotorning egilishi yoki rezonans chastotasining o'zgarishini qayd etadi. Kichik massaning kantiliverga yopishishi uning rezonans chastotasini sezilarli o'zgartiradi, bu esa fizik sezgirlikni nanomassalargacha oshiradi.

Nanobiosensorlar onkologik markerlar, infeksiyon agentlar, genetik mutatsiyalar, metabolik o'zgarishlar, toksinlar va suyuqlik tarkibi kabi ko'plab biomarkerlarni aniqlash imkonini beradi.

Optik sensorlar elektromagnit to'lqinlarning o'zgarishiga asoslanib biologik jarayonlarni kuzatadi; bioimpedans sensorlar to'qimalarning elektr xususiyatlaridan foydalanadi; nanobiosensorlar esa kvant darajadagi fizik jarayonlar orqali yuqori sezgir deteksiyani ta'minlaydi. Ushbu uch yo'nalish biotibbiyot muhandisligining eng tez rivojlanayotgan va innovatsion diagnostika texnologiyalarini yaratishda markaziy o'rin tutadi.

3.3. Hayotiy-tibbiy ko'rsatkichlarni o'lchash fizikasi.

Hayotiy muhim fiziologik ko'rsatkichlarni o'lchash fizikasi biotibbiyot muhandisligining eng asosiy yo'nalishlaridan birini tashkil etadi, chunki organizmning funksional holatini baholashda yurak faoliyati, nafas olish, qon bosimi, tana harorati, qonning gaz tarkibi, metabolik jarayonlar, mushak faolligi, asab impulslarining elektr tabiatiga oid ko'rsatkichlarni yuqori aniqlikda qayd etish zarur bo'ladi. Ushbu jarayonlar o'z tabiatiga ko'ra fizik, kimyoviy va elektrofiziologik mexanizmlarga asoslangan bo'lib, ularni o'lchash uchun maxsus

sensor tizimlari, transduserlar, signal kuchaytirgichlar, filtrlar va raqamli qayta ishlash algoritmlari qo'llaniladi. Hayotiy ko'rsatkichlarni o'lchash fizikasi – har bir fiziologik parametrlarning energiya manbaini, uni fizik kattalikka aylantirish jarayonini, signallarni modulatsiya va demodulatsiya qilish, elektr yoki optik shaklga o'tkazish, shovqinlarni kamaytirish va yakunda klinik ma'noga ega bo'lgan raqamli ma'lumotga aylantirish jarayonlarini qamrab oluvchi kompleks ilmiy yo'nalishdir.

Hayotiy ko'rsatkichlarni o'lchashning eng muhim yo'nalishlaridan biri – yurak faoliyati parametrlarini qayd etish bo'lib, bunda elektrokardiografiya yurakning elektr impulslarini teri yuzasidan o'lchaydi. EKG fiziologik elektr potentsiallarining ikki elektrod oralig'ida tarqalgan farqlanishiga asoslanadi va u asosan membrananing depolyarizatsiya–repolyarizatsiya jarayonlarini qayd etadi. EKG signalining fizik tabiati potensial farqning vaqt bo'yicha o'zgarishi bo'lib, uning amplitudasi millivoltlar tartibida, chastotaviy diapazoni esa bir necha gersdan yuzlab gersgacha bo'ladi. Ushbu signallarni to'g'ri o'lchash uchun elektrod–teri qarshiligini pasaytiruvchi o'tkazuvchan gel, yuqori kirish qarshiligiga ega kuchaytirgichlar, differensial o'lchash rejimi va shovqinlarni bostiruvchi filtrlar ishlatiladi.

Nafas olish parametrlari – nafas chastotasi, alveolyar ventilyatsiya, o'pkaga havo kirish va chiqish oqim tezligi – ko'pincha pnevmografiya, spirometriya yoki impedans tomografiyasi orqali qayd etiladi. Nafas oqimini o'lchashda Bernulli tenglamasi, havo oqimiga qarshilik, bosim farqlari va gidrodinamik modellar asosiy fizik poydevorni tashkil etadi. Masalan, spirometriya qurilmalarida havo oqimi differensial bosim sensori orqali o'lchanadi, bunda oqim tezligi bosim gradientiga bog'liq tarzda o'zgaradi va insonning nafas olish hajmi integral hisoblash orqali topiladi. Impedans tomografiyasida esa o'pka ichidagi havoning elektr o'tkazuvchanligiga ta'siri tahlil qilinadi, bu esa nafas olishdagi ventilyatsiya taqsimotining real vaqt monitoringini ta'minlaydi.

Qon bosimini o'lchash fizikasi ham klinik amaliyotning muhim qismidir. Qon tomirlarida bosimning paydo bo'lishi yurakning nasos funksiyasi, qonning oqimga ko'rsatadigan qarshiligi va tomir devorlarining elastik xususiyatlari bilan bog'liq. Qon bosimini invaziv bo'lmagan usulda o'lchash Korotkov tovushlari hodisasiga asoslanadi. Bu jarayon laminar oqimdan turbulent oqimga o'tishning akustik ko'rinishini qayd etish orqali amalga oshiriladi. Invaziv arterial bosim monitoringida esa kateter ichida joylashgan piezoelektrik bosim datchiklari orqali real vaqt rejimida tomir ichidagi bosim to'lqinlari o'lchanadi. Bu jarayon Nyuton mexanikasi, elastik to'lqinlar tarqalishi va gidrodinamik tenglamalar bilan izohlanadi.

Organizmning termoregulyatsiya holatini baholashda tana haroratini o'lchash fizikasi ishtirok etadi. Termosensornlarning ishlash mexanizmi harorat o'zgarishining elektr qarshilikka (termistorlar), termoelektrik kuchlanishga (termoparalar), yoki infraqizil nurlanish intensivligiga (IR termometrlari) bo'lgan ta'siriga asoslanadi. Masalan, kontakt bo'lmagan IR termometrlarda Stefan–Boltzmann qonuni asosida tana nurlanishining spektral kuch zichligi aniqlanadi va harorat hisoblanadi. Termistorlarda esa harorat ortishi bilan yarimo'tkazgich materialining qarshiligi sezilarli kamayadi, chunki issiqlik elektronlarning harakatchanligini oshiradi.

Qonning gaz tarkibi – kislorod, karbonat angidrid, pH – optik va elektrokimyoviy sensorlar yordamida o'lchanadi. Pulsoksimetriyada kislorodning gemoglobin bilan bog'lanishi yorug'likning spektral yutilishidagi farqlar orqali aniqlanadi. Qon gazlari analizatorlarida esa elektrodlar yordamida ion faolligi elektrokimyoviy potensialga konvertatsiya qilinadi. Bunda Nernst tenglamasi, diffuziya jarayonlari, ionlarning harakatchanligi kabi fizik-kimyoviy jarayonlar asosiy tamoyil bo'lib xizmat qiladi.

Asab va mushak faoliyatini o'lchashda EMG va EEG sensorlaridan foydalaniladi. EEG bosh miya neyronlarining postsinaptik potentsiallaridan hosil bo'ladigan

mikrovolt o'lchamdagi signallarni qayd etadi, signallarning chastotaviy tarkibi esa turli aqliy holatlarni, patologik jarayonlarni yoki uyqu bosqichlarini aniqlash imkonini beradi. Mushak faoliyatida EMG mushak tolalarining depolyarizatsiya jarayonini qayd etadi, bunda signallar amplitudasi EKGdan biroz yuqori bo'lib, mushakning qisqarish kuchiga proporsional o'zgaradi.

Perfuzion ko'rsatkichlarni o'lchash, masalan, qon oqimining periferik to'qimalarda taqsimlanish fizikasi Doppler effekti asosida ishlaydigan ultratovush oqim o'lchagichlari yoki optik perfuziya sensorlari orqali amalga oshiriladi. Doppler ultratovush usuli harakatlanuvchi qizil qon tanachalari tufayli qaytgan ultratovush signallarining chastota siljishini o'lchaydi. Bu fizik hodisa harakatlanuvchi ob'ektlar bilan to'lqinlar o'zaro ta'sirini tavsiflaydi va qon oqimining tezlik profilini aniqlashga imkon beradi.

Hayotiy ko'rsatkichlarni yuqori aniqlikda o'lchash uchun barcha fizik signallar qancha kichik bo'lmasin, ularni yuqori sezgirlikka ega kuchaytirgichlar, filtrlar, analog–raqam konvertorlari va noise-reduction algoritmlari yordamida qayta ishlash talab qilinadi. Shovqin manbalari – termik shovqin, elektromagnit induksiya, elektrod–teri interfeysidagi polarizatsiya shovqinlari, mexanik vibratsiyalar – maxsus konstruksion yechimlar orqali minimallashtiriladi. Ushbu texnik yondashuv diagnostik natijalar ishonchliligini, barqarorligini va takrorlanuvchanligini ta'minlaydi.

Shunday qilib, hayotiy muhim fiziologik ko'rsatkichlarni o'lchash fizikasi murakkab integratsiyalashgan tizim bo'lib, u inson organizmidagi elektr, mexanik, optik, issiqlik, kimyoviy va akustik jarayonlarni fizik signallarga aylantirishni ta'minlaydi. Ushbu fan yo'nalishi diagnostik texnologiyalarni yaratish, klinik monitoring tizimlarini takomillashtirish va zamonaviy biotibbiyot muhandisligining ilmiy asoslarini yanada chuqurlashtirishda markaziy o'rin tutadi.

3.3.1. Yurak ritmi sensorlari.

Yurak ritmi sensorlari zamonaviy biotibbiy texnologiyalarning eng muhim komponentlaridan biri bo'lib, inson yuragining elektr faolligini, mexanik qisqarish dinamikasini yoki qon oqimi tebranishlariga asoslangan ritmik faoliyatini yuqori sezgirlikda va real vaqt rejimida qayd etishga mo'ljallangan murakkab fizik-texnik tizimlardir. Yurak fiziologiyasi bioelektrik hodisalarga tayanadi, chunki miokard hujayralarining depolyarizatsiya va repolyarizatsiya jarayonlari natijasida yuzaga keladigan elektr potentsiallar butun organizm bo'ylab tarqalib, tananing tashqi yuzasida mikrovolt darajasidagi o'zgarishlar sifatida namoyon bo'ladi. Bu fizik jarayon yurak ritmini aniqlashning markaziy mexanizmini tashkil etadi va barcha yurak ritmi sensorlari shu bioelektrik hodisaning fizik modellariga asoslanadi.

Yurak ritmi sensorlarining eng keng tarqalgan turi elektrokardiografik prinsiplarga asoslangan bo'lib, unda teri yuzasiga joylashtirilgan elektrodlar miokardning vaqt bo'yicha o'zgaruvchi potensialini qayd etadi. Ushbu sensorlarning fizik poydevorida bioelektrik dipollar modeli yotadi, ya'ni yurakning har bir qisqarish bosqichi ma'lum vektorga ega elektr dipolini hosil qiladi, bu dipolning fazoviy yo'nalishi va amplitudasi tananing turli nuqtalarida turlicha potentsiallar hosil qiladi. Sensorlar ana shu differensial potentsiallarni o'lchash orqali yurak ritmining chastotasi, intervallari, ritm barqarorligi va patologik holatlarini aniqlaydi.

Yurak ritmi sensorlari yuqori darajada sezgirlikni talab qiladi, chunki yurakning elektr signallari, ayniqsa P-to'lqin va T-to'lqin kabi past amplitudali komponentlar shovqinlar ta'sirida oson yo'qolib ketishi mumkin. Shuning uchun zamonaviy yurak ritmi sensorlari teri–elektrod interfeysidagi qarshilikni minimallashtiruvchi o'tkazuvchan jel, kumush–xloriddan tayyorlangan elektrod materiali, differensial kuchaytirgichlar, yuqori kirish qarshiligi va past shovqinli analog front-end sxemalaridan foydalanadi. Signalni uzluksiz qayta ishlash uchun filtr tizimlari – yuqori chastotali shovqinlarni olib tashlovchi past o'tkazuvchi filtrlar, mushak

faolligidan kelib chiqadigan artefaktlarni kamaytiruvchi tor diapazonli filtrlar va tarmoq shovqinini bostiruvchi noth filtrlar qo'llanadi.

Yurak ritmi sensorlarining yana bir muhim turi fotopletizmografik (PPG) sensorlar bo'lib, ular yurak urishiga mos ravishda tomir ichidagi qon hajmining periodik o'zgarishini optik prinsiplarga tayanib o'lchaydi. Ushbu texnologiya yorug'likning to'qimalardan qaytish yoki yutilish koeffitsientining qon hajmiga proporsional o'zgarishiga asoslanadi. PPG sensorlarida odatda qizil yoki infraqizil LED yorug'lik manbai va qaytgan yorug'likni aniqlovchi fotodiod ishlatiladi; yurakning sistola bosqichida qon tomirining kengayishi yorug'likning yutilishini oshiradi, diastolada esa yutilish kamayadi. Shu tarzda yurak ritmi optik signalning pulsatsiyalari orqali o'lchanadi. PPG sensorlarining fizik asosida Beer–Lambert qonuni, yorug'lik sochilish dinamikasi va puls to'lqinining arterial devorlar bo'ylab tarqalish xususiyatlari yotadi.

Mexanik jarayonlarga asoslangan yurak ritmi sensorlari ham mavjud bo'lib, ular tomir devorining tebranishi, arterial devorning mikrohajmiy siljishi yoki yug'on tomirlardagi puls to'lqinining mexanik aksini qayd etadi. Bunday sensorlarda piezoelektrik elementlar yoki akselerometrlar qo'llaniladi. Piezoelektrik sensorlar bosimning ritmik o'zgarishini zaryadning hosil bo'lishiga konvertatsiya qiladi, akselerometrlar esa tananing mikrotebranishlarini o'lchaydi va yurakning mexanik faoliyati bilan bog'liq ritmik akslanmalarni aniqlaydi. Ushbu mexanik sensorlar puls diagnostikasida, yurak ritmini jismoniy faoliyat paytida monitoring qilishda yoki ko'chma tibbiy qurilmalarda keng qo'llaniladi.

Zamonaviy yurak ritmi sensorlari signalni o'z vaqtida qayta ishlash uchun murakkab algoritmlar, xususan piklarni aniqlash (R-to'lqin deteksiyasi), intervallarni hisoblash, ritmning barqarorligini baholash, aritmiyalarni aniqlash, yurak urishi variabelligini tahlil qilish kabi funksiyalardan foydalanadi. Yurak ritmi variabelligi (HRV) organizmning vegetativ nerv tizimi faoliyati bilan bog'liq bo'lib, uning fizik modeli vaqt domeni, chastota domeni va nelinear tizimlar

nazariyasiga asoslanadi. HRV tahlili yuqori darajadagi signal–shovqin nisbatini talab qiladi, shuning uchun sensorning fizik sifati diagnostikaning hal qiluvchi omiliga aylanadi.

Ko‘chma yoki “wearable” yurak ritmi sensorlari so‘nggi yillarda sezilarli darajada takomillashib, mikroelektronika, optik texnologiyalar, past energiya iste‘moli va raqamli uzatish protokollariga asoslangan kompakt tizimlarga aylandi. Ular foydalanuvchining bilagiga, ko‘kragiga yoki kiyimiga integratsiyalangan holda uzluksiz yurak ritmini qayd etadi. Bu sensorlar simsiz aloqa orqali ma’lumotlarni smartfon yoki serverga uzatib, real vaqt monitoringini ta’minlaydi. Ularning fizik dizayni past quvvatli signal kuchaytirgichlar, integratsiyalangan optik modul, CMOS fotodiodlar va past shovqinli ADC tizimlariga asoslanadi.

Yurak ritmi sensorlarining ishonchliligi ularning tashqi shovqinlarga chidamliligi, teri bilan kontaktning barqarorligi, elektromagnit interferensiyaga bardoshliligi va signallarni to‘g‘ri filtrlash qobiliyatiga bog‘liq. Sensorlar mushak faolligidan kelib chiqadigan EMG artefaktlari, terining harakatidan kelib chiqqan bazal siljish, elektromagnit shovqinlar va optik sensorlarda atrof yorug‘ligidan kelib chiqadigan interferensiya kabi omillarni minimallashtirish uchun maxsus konstruktiv yechimlar bilan jihozlanadi.

Yurak ritmi sensorlari inson organizmining eng muhim fiziologik jarayonlaridan birini o‘lchash uchun yuqori sezgirlikka ega bo‘lgan fizik qurilmalar bo‘lib, ular bioelektrik, optik va mexanik jarayonlarga asoslanadi. Ushbu sensorlar fiziologik monitoring tizimlarining markaziy elementi bo‘lib, klinik amaliyotda, sport tibbiyotida, reabilitatsiyada, yurak kasalliklarining erta tashxisida va telemeditsina tizimlarida keng qo‘llaniladi. Ularning fizik asoslarini chuqur o‘rganish biotibbiyot muhandisligi sohasida yuqori sifatli diagnostik tizimlar yaratishning muhim sharti hisoblanadi.

3.3.2. O'pka ventilyatsiya monitoringi.

O'pka ventilyatsiyasi monitoringi zamonaviy klinik amaliyotda, ayniqsa reanimatsiya, anesteziologiya, neonatologiya va intensiv terapiya bo'limlarida bemorning hayotiy holatini baholashning eng muhim unsurlaridan biridir. Ventilyatsiya jarayoni fiziologik jihatdan o'pkaga havo kirishi va chiqishi, alveolyar gazlar almashinuvi, o'pkadagi elastik va qarshilik elementlarining muvozanati, diafragma va yordamchi nafas mushaklarining mexanik ishlashi bilan bevosita bog'liq bo'lib, ushbu jarayonlarni aniqlik bilan baholash uchun maxsus fizik, mexanik, akustik va optik o'lchash tamoyillariga asoslangan monitoring tizimlari qo'llaniladi. Ventilyatsiya monitoringining fizik mohiyati – o'pka ichidagi havo miqdori, hajm o'zgarishi, bosim farqlari, oqim tezligi, gazlarning konsentratsiyasi va alveolyar ventilyatsiyaning samaradorligini real vaqt rejimida qayd etishdan iborat.

Ventilyatsiya monitoringida eng ko'p qo'llaniladigan o'lchov usullaridan biri spirometriya bo'lib, unda nafas oqimi tezligining bosim gradienti bilan bog'liqligi orqali o'pkaning hajmiy ko'rsatkichlari qayd etiladi. Spirometrlarning fizik asosida Bernulli tenglamasi, oqimga qarshilikning gidrodinamik modeli va havo harakatlanishidagi laminar-turbulent o'tish xususiyatlari yotadi. Nafas chiqarish jarayonida havo oqimi maxsus toraytirilgan kanal orqali o'tganda bosim farqi yuzaga keladi va bu farq oqim tezligiga proporsional bo'ladi. Shu tarzda o'lchangan tezlik signali vaqt bo'yicha integrallanganda o'pkaning hayotiy sig'imi, majburiy ekspirator hajmi, maksimal oqim tezligi va boshqa ko'rsatkichlar olinadi. Ventilyatsiya monitoringida ishlatiladigan yana bir muhim texnologiya – kapnografiya bo'lib, u nafas chiqarilgan havodagi karbonat angidridning konsentratsiyasini optik absorbsiya tamoyili orqali o'lchaydi. CO₂ molekulalarining infraqizil nurni yutish xususiyati Beer–Lambert qonuni asosida qayd etiladi va har bir nafas sikli davomida alveolyar ventilyatsiya samaradorligini aks ettiradi. Kapnogramma nafas yo'llari patensiyasi, ventilatsiya–perfuzion

muvozanat, o'pka ichidagi havoning almashinuvi va nafas olish dinamikasini aniqlashda juda sezgir fizik indikator sifatida xizmat qiladi.

Zamonaviy reanimatsiya amaliyotining eng innovatsion texnologiyalaridan biri – **elektrik impedans tomografiyasi (EIT)** bo'lib, u o'pka ichidagi havoning taqsimlanishini real vaqt rejimida aniqlash imkonini beradi. EIT fizik jihatdan ko'p chastotali o'zgaruvchan tokning ko'krak qafasi bo'ylab tarqalishi va uning elektr impedansga bog'liq o'zgarishlarini o'lchashga asoslanadi. Havo elektr tokini o'tkazmaydigan muhit bo'lgani sababli, nafas olish paytida o'pkada havo hajmining ortishi impedansning o'sishiga, nafas chiqarishda esa kamayishiga olib keladi. Olingan impedans kartasi matematik rekonstruksiya yordamida ko'krak qafasining kesim bo'ylab tasvirini yaratadi va alveolyar ventilyatsiyaning notekis taqsimlanishini aniq ko'rsatadi.

Ventilyatsiya monitoringining fizik asosida o'pkadagi bosim–hajm (P–V) munosabati ham muhim o'rin tutadi. O'pkaning elastik komponentlari Hooke qonuniga o'xshash chiziqli, ammo yuqori bosimlarda nolinear tarzda ishlaydi. P–V diagrammasidagi past burilish nuqtasi alveolalar ochilishini, yuqori burilish nuqtasi esa alveolalarning ortiqcha cho'zilishini bildiradi. Mexanik ventilyatsiya jarayonida bosim, oqim va hajm signalining real vaqt rejimida qayd etilishi ventilyator ustawkalarini bemorga individual moslashtirishda muhim fiziologik va fizik omil hisoblanadi.

O'pka ventilyatsiyasi monitoringida akustik texnologiyalar ham qo'llaniladi. O'pka auskultatsiyasi an'anaviy usul bo'lsa-da, zamonaviy elektron stetoskoplar va akustik sensorlar yordamida o'pkadagi havo oqimining turbulent harakati, bronxlarni torayishi, pufakchalar ichidagi havo-suyuqlik sathlarining tebranishi kabi jarayonlar chastotaviy tahlil asosida aniqlanadi. Bu analiz Fourier transformatsiyasi, spektral zichlik funksiyasi va akustik rezonans modellariga tayanadi.

Ventilyatsiya monitoringining yana bir muhim yoʻnalishi – pulsoksimetriya boʻlib, u ventilyatsiya va perfuziya muvozanatini baholashda kislorodning gemoglobin bilan bogʻlanish darajasi orqali bilvosita koʻrsatkich beradi. Optik sensorlar yordamida qizil va infraqizil nurlarning yutilish farqlari hisoblanib, arterial kislorod saturatsiyasi aniqlanadi. Ventilyatsiya buzilgan holatlarda (gipoventilyatsiya, obstruktiv kasalliklar, oʻpka shishi) SpO_2 darajasining oʻzgarishi ventilyatsiya samaradorligini bilvosita oʻlchash imkonini beradi.

Ventilyatsiyaning mexanik monitoringida oʻpka qarshiligi (Resistance) va elastans (Elastance) kabi parametrlar fizik modellarga asoslanadi. Havo yoʻllarining qarshiligi Poazeyl qonuni bilan izohlanadi, yaʼni oqimga qarshilik naycha radiusining toʻrtinchi darajasi bilan teskari proporsionaldir. Oʻpkaning elastik xususiyatlari esa uning choʻzilish qobiliyatini aks ettiradi va matyor elastik energiya sigʻimini aniqlaydi. Bu parametrlar ventilyator yordamida nafas olayotgan bemorlarda juda muhim diagnostik koʻrsatkich boʻlib, oʻpka shishi, ARDS, bronxospazm yoki atelektaz jarayonlarini aniqlashga yordam beradi.

Shunday qilib, oʻpka ventilyatsiyasi monitoringi turli fizik tamoyillarga – gaz dinamikasi, optik absorbsiya, elektr impedans, bosim–hajm mexanikasi, akustik rezonans va spektral tahlil – asoslangan koʻp komponentli tizimdir. Har bir texnologiya ventilyatsiyaning maʼlum bir koʻrsatkichini aniqlab, birgalikda organizmning nafas olish tizimini toʻliq baholash imkonini beradi. Bu monitoring tizimlarining ilmiy-fizik asoslarini chuqur oʻrganish yuqori aniqlikdagi diagnostika, xavfsiz mexanik ventilyatsiya boshqaruvi va bemorlarning klinik holatini optimal nazorat qilish uchun zarurdir.

IV-BOB. INTEGRATSIYA ASOSIDA AMALIY TIBBIY TEKNOLOGIYALAR.

4.1. Sunʼiy aʼzolar fizikasi

Sunʼiy aʼzolar fizikasi biotibbiyot muhandisligining inson hayot sifatini yaxshilashga qaratilgan eng murakkab va innovatsion yoʻnalishlaridan biri boʻlib,

u tabiiy organlarning fiziologik funksiyalarini fizik modellar asosida chuqur o'rganish, ularning mexanik, elektr, gidrodinamik, kimyoviy va energetik xususiyatlarini sun'iy biomexanik tizimlarga ko'chirish, bunday qurilmalar bilan biologik muhitning o'zaro ta'sirini matematik modellashtirish hamda organizm bilan moslashuvchan integratsiyani ta'minlash jarayonlarini o'z ichiga oladi. Sun'iy a'zolar tabiiy organlarning to'liq yoki qisman funksional o'rnini bosuvchi qurilmalar bo'lib, ularning ishlashida fizik jarayonlarni to'g'ri tushunish va modellashtirish hal qiluvchi ahamiyat kasb etadi.

Sun'iy a'zoning ishlash prinsipi avvalo o'sha organning fiziologik funksiyasini fizik tilda ifodalashdan boshlanadi. Masalan, sun'iy yurakning fizik modeli gidravlik nasos tamoyillariga asoslanadi, chunki yurak fiziologik tomir tizimi orqali qon oqimini ta'minlash uchun bosim farqlari yaratadi, oqim tezligini tartiblaydi va siklik mexanik qisqarishni amalga oshiradi. Bu jarayon Navye–Stoks tenglamalari, Poazeyl qonuni, elastik trubalar bo'ylab to'lqin tarqalishi va titrashlar dinamikasi kabi mexanik va gidrodinamik jarayonlar yordamida modellashtiriladi. Sun'iy yurak apparati shu modellarning amaliy ko'rinishi bo'lib, uning kamarlaridagi membrana harakati yoki rotor aylanishi qon oqimini fiziologik tarzda ta'minlaydigan gidrodinamik mexanizm sifatida xizmat qiladi.

Sun'iy buyrak, ya'ni gemodializ tizimlari fizikasi yarim o'tkazuvchi membrana orqali modda almashinuviga asoslanadi. Dializ jarayonida qon va dializ suyuqligi orasidagi konsentratsiya farqi diffuziyani hosil qiladi. Fick qonunlari orqali diffuziya tezligining konsentratsiya gradientiga bog'liqligi, membrananing o'tkazuvchanligi, filtratsiya bosimi, osmotik kuchlar va suyuqlik oqim tezligi fizik modelining markazida turadi. Sun'iy buyrak qurilmasida yarim o'tkazuvchi polimer membranalarning pora tuzilishi, ularning molekulyar og'irlik bo'yicha chegaralovchi xususiyatlari va gidrodinamik qarshilik dializ samaradorligini belgilovchi asosiy omillardir.

Sun'iy o'pka tizimlari (ekstrakorporal membrana oksigenatsiyasi – ECMO) fizikasi gaz almashinuvining diffuziya va konveksiya jarayonlariga asoslanadi. O'pkadagi alveolyar kapillyarlar tizimini sun'iy ravishda modellashtirish uchun yuqori yuzaga ega bo'lgan g'ovak membranalaridan foydalaniladi. Gazning eritma ichida eruvchanligi, diffuziya tezligi, oqimning laminar yoki turbulent xarakteri, perfuziya va ventilyatsiya nisbatlari fizik model orqali qat'iy nazorat qilinadi. Bu tizimning fizik ishlashi organizmning tabiiy o'pkasi kabi gaz almashinuvini ta'minlash uchun muhimdir.

Sun'iy eshitish a'zosi – koxlear implantlar fizikasi akustik to'lqinlar va elektr signallarni o'zaro konversiya qilish mexanizmlariga asoslanadi. Koxleaning tabiiy funksiyasi mexanik tebranishlarning tonotopik tarzda ajratilishi bo'lsa, sun'iy implantlar ovozni elektromagnit transduksiya orqali kodlaydi va to'g'ridan-to'g'ri eshitish nervi tolalarini stimulyatsiya qiladi. Bu jarayon akustik energiyaning mikrofon orqali elektr energiyaga aylanishi, signallarning chastota bo'yicha filtrlash tizimlari, pulsli elektrostimulyatsiya algoritmlari va nerv impulslarining o'tish fiziologiyasi bilan chambarchas bog'liq.

Sun'iy ko'rish tizimlari, ya'ni retinal implantlar fizikasi fotonlarning elektr impulsga aylanish jarayoniga asoslanadi. Tabiiy retinada fotoreseptor hujayralar orqali yorug'likning fotokimyoviy reaksiyaga aylanishi, bipolar va ganglion hujayralarida signallarning kuchayishi va qayta ishlanishi sodir bo'ladi. Sun'iy retina esa matritsa ko'rinishidagi mikroelektrodlar yordamida yorug'lik intensivligi va kontrastini elektr stimul signallariga konvertatsiya qiladi. Bu jarayon optik signallarni elektr signallarga aylantirish, to'qimalar bilan interfeysning elektr qarshiligi, signalning fazoviy kodlanishi va to'qimalarda energiya yutilishining xavfsiz doiralari bilan bog'liq.

Sun'iy oyoq-qo'l protezlari fizikasi mexanik kuchlar, inertsia momenti, biomexanik bo'g'inlarning erkinlik darajalari, yuk ko'tarish modeli va dinamik barqarorlik qonunlariga asoslanadi. Protez bo'g'inlarining harakati tabiiy skelet–

mushak tizimiga o'xshash momentlar balansiga asoslanadi, bunda Nyutonning ikkinchi qonuni bo'yicha kuch–tezlanish munosabati, bo'g'inlar qayta tiklanish mexanikasi, amortizatsiya jarayoni va energiya sarfining biomexanik modellaridan foydalaniladi. Elektro-mexanik protezlarda esa sirt EMG signallarining mushak faolligini ifodalovchi elektr potentsiallari qayd etilib, servomotorlar orqali harakatga aylantiriladi.

Sun'iy a'zolarining barcha turlarida materialshunoslik fizikasi muhim o'rin tutadi. Biomog'orlik, biokompatibilik, korroziyaga chidamlilik, elastiklik moduli, dielektrik xossalar, issiqlik o'tkazuvchanlik kabi parametrlar sun'iy a'zoning organizm bilan uzoq muddatli moslashuvini belgilaydi. Tibbiy implantlarda ishlatiladigan materiallar – titan qotishmalari, silikon elastomerlar, polietilen, keramika kompozitlar, biomimetik polimerlar – fizik-mexanik xususiyatlarining barqarorligi va biologik muhitga befarqligi bilan ajralib turadi.

Shunday qilib, sun'iy a'zolar fizikasi – biologik organlarning fizik-fiziologik modellarini chuqur o'rganish, ularni texnik tizimlarga transfer qilish, organ–implant interfeysidagi fizik jarayonlarni boshqarish va inson organizmi bilan moslashuvni ta'minlovchi murakkab multidissiplinar yo'nalishdir. Ushbu jarayonlarning fizikasini bilish sun'iy organlar dizayni, xavfsizligi, samaradorligi va klinik qo'llanishdagi barqarorligini ta'minlaydigan hal qiluvchi omildir.

4.2. Tibbiy robototexnikada fizik jarayonlar.

Tibbiy robototexnikada fizik jarayonlar zamonaviy tibbiyotning yuqori texnologik yo'nalishlaridan birini tashkil etib, robotlarning murakkab anatomik tuzilmalar bilan xavfsiz va yuqori aniqlikda o'zaro ta'sirini ta'minlaydigan elektromexanik, kinetik, biologik, sensorik va algoritmik tizimlarning chuqur integratsiyasiga asoslanadi. Tibbiy robotlar — ayniqsa jarrohlik robotlari, reabilitatsiya robotlari, mikro- va nanorobotlar, qayta tiklovchi va yordamchi robotlar — inson fiziologiyasining mexanik, elektr, gidrodinamik va akustik

jarayonlariga moslashgan holda ishlashi tufayli fizik qonuniyatlarning to'g'ri modellashtirilishi ularning samaradorligi va klinik xavfsizligi uchun hal qiluvchi omildir.

Tibbiy robototexnikaning asosiy fizik poydevorlaridan biri mexanik tizimlarning harakat dinamikasi bo'lib, robot bo'g'inlarining erkinlik darajasi, inertsia momentlari, massa taqsimoti, bo'g'inlar orasidagi kinematik bog'lanishlar va uchuvchi kuchlar Nyuton–Eyler yoki Lagrange mexanikasi orqali modellashtiriladi. Jarrohlik robotlarida qo'l uchidagi manipulyatorlarning millimetr yoki submillimetr darajadagi aniqlikda pozitsiyalanishi zarur bo'lgani uchun mexanik tizimlarning barqarorligi, harakat silliqdigi va kechikishsiz servo boshqaruvi juda muhimdir. Bunda motorlarning aylanish momenti, moment–tezlik munosabati, tishli uzatmali mexanizmlardagi energiya yo'qotishlari, friksion kuchlar, elastik elementlarning deformatsiyasi va mexanik rezonanslar kabi fizik jarayonlar tibbiy robotning umumiy ishlash sifatiga bevosita ta'sir qiladi.

Tibbiy robotlarda aktuatorlar fizikasi ham muhim o'rin tutadi. Servomotorlar, piezoelektrik aktuatorlar, pnevmatik yoki gidravlik aktuatorlar harakatni hosil qilib, robot manipulyatorlariga uzatadi. Jarrohlik robotlarida ko'p hollarda yuqori aniqlik talabi sababli servoelektrik aktuatorlar yoki piezoaktuatorlar qo'llaniladi, chunki ular kichik burchak burilishi va mikrometr darajadagi chiziqli siljishlarni juda past inertsia bilan hosil qila oladi. Reabilitatsiya robotlarida esa inson bo'g'inlarining tabiiy harakati bilan moslashuvchan interfeys yaratish uchun pnevmatik-mushak (PAM), elastomer aktuatorlar yoki yumshoq robotika elementlaridan foydalaniladi. Ularning fizikasi havo bosimi, elastik modullar, viskoelastik kuchlanish, siqilish va qayta tiklanish jarayonlari bilan bog'liq.

Sensorik jarayonlar tibbiy robototexnikada alohida ahamiyatga ega bo'lib, ular robotning biologik muhit bilan o'zaro ta'sirini nazorat qiladi. Kuch-tortilish sensorlari, moment datchiklari, inertial o'lchov bloklari (IMU), optik pozitsiya sensorlari va elektromagnit treking tizimlari robot manipulyatorining holatini,

yoʻnalishini va biologik toʻqima bilan kontakt kuchini yuqori sezgirlikda aniqlaydi. Kuch sensorlari Hooke qonuni asosida ishlaydi, yaʼni elastik elementning deformatsiyasi kuchning oʻlchamiga proporsional boʻladi. Toʻqimaga haddan tashqari bosim qoʻllanishining oldini olish uchun robot tizimi real vaqt rejimida kontakt kuchini oʻlchab, qayta aloqa mexanizmi orqali harakat traektoriyasini moslashtiradi. Optik trekingda esa infraqizil kameralar va yoritgichlar yordamida maxsus markerlarning fazoviy joylashuvi triangulyatsiya usuli bilan aniqlanadi.

Tibbiy robotlardagi boshqaruv tizimlari fizik jarayonlarning matematik modellariga tayanadi. Robot boʻgʻinlaridagi inertsia, markazdan qochma kuchlar, koriyolis kuchlari va tortishish kuchlarining kompensatsiyasi kaskadli boshqaruv tizimlari, adaptiv boshqaruv yoki model asosidagi boshqaruv orqali amalga oshiriladi. Jarrohlik robotlarida harakatning tezkorlik darajasi bilan birga vibratsiyalarni kamaytirish ham juda muhim, chunki mikrorezonanslar manipulyator uchida katta xatolarga olib kelishi mumkin. Shu sababli aktiv damperlar yoki PID+feedforward boshqaruv strategiyalari orqali mexanik tizimlar barqarorlashtiriladi.

Tibbiy robototexnikada koʻrish tizimlari fizikasi ham muhim oʻrin tutadi. Jarrohlik robotlarida uch oʻlchamli tasvirlash, stereokameralar, endoskopik optik tizimlar va yuqori aniqlikdagi vizualizatsiya optik difraksiya, fokuslanish fizikasi, yoritish samaradorligi, rang spektrining qayta ishlanishi va optik sensorlarning sezgirligi orqali boshqariladi. Stereovizualizatsiyada ikki kamera tomonidan olingan tasvirlarning dispariteti yuqori aniqlikdagi triangulyatsiya modeli orqali uch oʻlchamli makon tasviriga aylantiriladi. Optik tizimlarning fizik xossalari – yorugʻlik sochilishi, refraksion indekslar farqi, toʻqimalarning yutilish spektri – jarrohlik maydonining vizual sifatiga bevosita taʼsir qiladi.

Tibbiy robotlar bilan biologik toʻqima oʻrtasidagi mexanik oʻzaro taʼsir fizikasi ham juda murakkab. Inson toʻqimalari turli elastiklik moduliga, viskoelastiklikka, nolinear deformatsiyaga va qayta tiklanish darajasiga ega boʻlib, robot

manipulyatori bilan kontaktda bu o'zgarishlar vaqt bo'yicha ham, kuchlanish bo'yicha ham nolinear tarzda sodir bo'ladi. To'qimalarning mexanik modeli Kelvin–Voigt, Maxwell yoki Zener viskoelastik ekvivalent sxemalari orqali ifodalanadi. Jarrohlik robotlarida kuchni sezishni takomillashtirish uchun haptik qayta aloqa tizimlari qo'llaniladi, ular sensorlardan olingan mexanik signallarni foydalanuvchiga qaytarib uzatadi va jarrohni to'qimalar rezistentligi haqida xabardor qiladi.

Tibbiy robototexnikaning yana bir muhim yo'nalishi — mikro- va nanorobotlar fizikasi bo'lib, ular turli darajadagi fizik kuchlanganlik, viskoz muhitda harakatlanish qoidalari va elektromagnit boshqaruv mexanizmlariga asoslanadi. Mikro miqyosdagi robotlar Reynolds soni juda kichik bo'lgan muhitlarda ishlaydi, bu esa suyuqlik oqimlarining laminar bo'lishi, harakatga qarshilikning yuqori bo'lishi va inertsia deyarli yo'qligini bildiradi. Bunday sharoitlarda robotlar harakatni viskoz qarshilikni yengish orqali amalga oshiradi va elektromagnit maydonlar yordamida boshqariladi.

Shunday qilib, tibbiy robototexnikada fizik jarayonlar harakat mexanikasi, aktuatorlar fizikasi, sensor tizimlarining sezgirliги, optik va elektromagnit treking, haptik qayta aloqa, to'qima–robot interfeysining mexanik modeli, stabilizatsiya va boshqaruv algoritmlarining fizik asoslari kabi ko'plab komponentlarning uzviy integratsiyasidan iborat murakkab kiber-fizik tizimni tashkil etadi. Bu jarayonlarni chuqur o'rganish tibbiy robotlarning klinik samaradorligini oshirish, xavfsiz ishlashini ta'minlash va ularni kelajakdagi intellektual tizimlar bilan uyg'unlashtirish uchun fundamental ahamiyatga ega.

4.3. Biotibbiyot muhandisligida fizik model yaratish.

Biotibbiyot muhandisligida fizik model yaratish — tirik organizmning murakkab fiziologik jarayonlarini matematik, mexanik, elektr, gidrodinamik yoki elektrokimyoviy ko'rinishga o'tkazish orqali ularni chuqur tahlil qilish, kompyuter simulyatsiyasi yordamida takrorlash, texnik qurilmalar yaratishda qo'llash va

klirik bashoratlar keltirib chiqarish imkonini beruvchi, yuqori darajada multidissiplinar ilmiy yondashuvdir. Fizik modellashtirishning asosiy vazifasi — tabiiy biologik tizimlarning funksional xatti-harakatini fizik qonuniyatlar asosida ifodalash, tajriba qilib bo‘lmaydigan yoki real sharoitda o‘lchash qiyin bo‘lgan jarayonlarni raqamli yoki laboratoriya muhitida qayta yaratish va ularning o‘zgarishiga turli parametrlarning ta‘sirini baholashdan iborat. Bu jarayon ko‘p bosqichli bo‘lib, unda fiziologik jarayonlarni fizik hodisalarga moslashtirish, ekvivalent parametrlarni aniqlash, tenglamalar tizimini tuzish, numerik yechimlarni ishlab chiqish va yakuniy modellarni biologik ma‘lumotlar bilan verifikatsiya qilish kabi murakkab bosqichlar mavjud.

Fizik modellashtirishning poydevori tizimning fiziologik xususiyatlarini fizik tilga tarjima qilishdan boshlanadi. Masalan, yurak faoliyatini modellashtirishda elektr depolyarizatsiya jarayoni membrana potensialining vaqt bo‘yicha o‘zgarish tenglamalari orqali ifodalanadi. Hodgkin–Huxley modeliga o‘xshash ion oqimlari dinamikasi, membrana kanallari orqali ionlarning oqimi va ionlarning konsentratsion gradientlari fizik-kimyoviy jarayonlar asosida matematik formulalar bilan ifodalanadi. Mexanik modellashtirishda esa yurak mushaklarining qisqarishi sarin–aktin o‘zaro ta‘siri, mushak tolalarining elastik–viskoelastik xususiyatlari, qonni pompalash jarayonidagi bosim–hajm sikllari kabi komponentlar bilan modellashtiriladi.

Gidrodinamik modellar biotibbiyotda o‘ta keng qo‘llaniladi. Qon oqimi, limfa oqimi, o‘pkadagi havo harakati yoki hujayralararo suyuqlik dinamikasi Navye–Stoks tenglamalari, Poazeyl qonuni, Bernulli tenglamasi va laminar–turbulent oqim o‘tish mexanizmlari asosida modellashtiriladi. Qon tomirlarining elastikligi ham muhim komponent bo‘lib, tomir devorlarining deformatsiyasi elastik trubalar modeli, murakkab holatlarda esa viskoelastik modellar orqali ifodalanadi. Tibbiy qurilmalar, masalan stentlar, kardiovaskulyar protezlar yoki sun‘iy yurak klapanlarining samaradorligi ana shunday modellar yordamida baholanadi.

Biotibbiyot muhandisligida fizik modellashtirishning yana bir muhim yoʻnalishi — elektr jarayonlarni modellashtirishdir. Bioelektrik tizimlar (EKG, EEG, EMG, nerv impulslari) asosan membrana potentsiali, elektr oʻtkazuvchanlik, kapasitans, ion kanallar faoliyati va toʻqimalar ichidagi elektr maydonlarning tarqalishiga asoslanadi. Masalan, miyadagi elektr jarayonlarning modellashtirilishida har bir neyron Hodgkin–Huxley yoki FitzHugh–Nagumo tenglamalari asosida ifodalanadi; katta neyron toʻplamlarida esa shovqinli koʻp agentli tizimlar va toʻlqin tarqalishi modellaridan foydalaniladi. EKG modellarida elektr dipolning tanadagi tarqalishi Poisson tenglamasi yoki Maxwell tenglamalari orqali hal etiladi. Bu modellar yurakning elektr xaritasini yaratish, aritmiyalarni bashorat qilish va kardiyak radiochastota ablatsiya algoritmlarini takomillashtirishda muhim vosita boʻladi.

Termiklik modellar ham biotibbiyot sohasida keng qoʻllanadi. Toʻqimalardagi issiqlik tarqalishi Furiye tenglamasi, issiqlik sigʻimi, issiqlik oʻtkazuvchanlik va konvektiv issiqlik almashinuvining tenglamalari orqali modellashtiriladi. Ushbu modellar lazer jarrohligi, radiochastota ablatsiyasi, krioterapiya, gipertermiya onkologiyasi kabi tibbiy texnologiyalarning asosiy nazariy platformasini tashkil etadi. Toʻqimalarning issiqlik javobi fiziologik jihatdan ham muhim boʻlib, issiqlikning oshishi oqsil denaturatsiyasi yoki hujayra stressiga olib kelishi mumkin, shuning uchun issiqlik modellarining aniqligi klinik xavfsizlik nuqtai nazaridan zarurdir.

Optik modellar biotibbiy tasvirlash (optik tomografiya, spektroskopiya, pulsoksimetriya) va biotibbiy sensorlarda qoʻllaniladi. Yorugʻlikning toʻqimalardan oʻtishi, yutilishi, sochilishi va spektral tarqalishi Maxwell tenglamalari, radiativ transfer tenglamalari va Mie–Rayleigh sochilish nazariyalari bilan izohlanadi. Bu modellar biologik toʻqimalar optik xossalarini aniqlash, optik diagnostika qurilmalarini loyihalash va fototerapiya parametrlarini optimallashtirishda qoʻllaniladi.

Mikro va nanosistemalar fizik modellashtirishida esa suyuqlik dinamikasining mikroskaladagi xususiyatlari, kvant effektlari, nanozarrachalar harakati, diffuziya, biomolekulalarning fizik oʻzaro taʼsiri va sirt energiyasi oʻzgarishlari hisobga olinadi. Mikrofluidik tizimlar fiziologik jarayonlarni laboratoriya miqyosida takrorlash imkonini beradi; hujayra madaniyatlarini, qon tahlillarini, molekulyar sinovlarni “lab-on-a-chip” texnologiyasi asosida modellashtiradi.

Fizik modellashtirishning ajralmas qismi — raqamli simulyatsiyadir. Finite Element Method (FEM), Finite Difference Method (FDM), Computational Fluid Dynamics (CFD), Monte–Carlo simulyatsiyasi, Multi-Physics modellar bir tizimning turli fizik jarayonlarini birlashtirib, murakkab biologik tizimlarini bir vaqtning oʻzida modellashtirish imkonini beradi. Masalan, yurak modelingizaga CFD va elektrofiziologik modellarni birlashtirish orqali yurak mushagi qisqarishining elektr va qon oqimi bilan bogʻliqligi chuqur oʻrganiladi.

Fizik model yaratish jarayoni yakunda verifikatsiya va validatsiya bosqichidan oʻtadi. Verifikatsiya — modelning matematik jihatdan toʻgʻriligi, yechim algoritmlarining barqarorligi va tenglamalarning toʻgʻri qoʻllanganligini tekshirish jarayonidir. Validatsiya esa modelning haqiqiy biologik yoki klinik maʼlumotlarga mosligini tekshiradi. Bu bosqichda fiziologik oʻlchovlar, klinik testlar va tajriba maʼlumotlari bilan solishtirish amalga oshiriladi.

Shunday qilib, biotibbiyot muhandisligida fizik model yaratish — fiziologik jarayonlarni chuqur fizik tushuntirish, ularni matematik modellashtirish, murakkab hisoblash usullari yordamida rekonstruksiya qilish va klinik tizimlar bilan integratsiyalashgan holda baholash imkonini beruvchi, tibbiy texnologiyalarni yaratish va takomillashtirishning ilmiy poydevoridir. Bu jarayonning toʻgʻri tashkil etilishi sunʼiy organlar, tibbiy robotlar, diagnostik qurilmalar, biosensorlar, reanimatsiya monitoringi tizimlari va terapevtik apparatlarning funksional samaradorligini sezilarli darajada oshiradi.

V-BOB. FIZIK TA'LIMNING BIOTIBBIYOT MUHANDISLIGIGA INTEGRATSIYA MODELLARI.

5.1. CLIL, STEAM va loyihaviy o'qitish.

Biotibbiyot muhandisligi yo'nalishida fizik ta'limni samarali tashkil etish zamonaviy ta'lim metodologiyasining integrativ modellaridan — CLIL, STEAM va loyihaviy o'qitish yondashuvlaridan foydalanishni talab qiladi. Ushbu uch konsepsiya bir-biri bilan o'zaro uyg'unlashgan holda o'quv jarayonida nazariy fizik bilimlarni amaliy muhandislik vazifalariga tatbiq qilish, tibbiy texnologiyalarni yaratish jarayonida talabalar faoliyatini o'quv va tadqiqot faoliyati bilan integratsiya qilish, shuningdek, zamonaviy biotibbiyot muhandisining kompetensiyalarini shakllantirish uchun muhim ilmiy-pedagogik imkoniyatlar yaratadi. CLIL, STEAM va loyihaviy o'qitish modellari o'zining didaktik mohiyatiga ko'ra, talabaning bilimni tayyor shaklda qabul qilish emas, balki bilimni faol ijodiy jarayon orqali o'zlashtirishiga tayanadi; bunda fizik jarayonlarning ilmiy mohiyatini tibbiy qurilmalar, diagnostika texnologiyalari, biotibbiy sensorlar, robototexnika, sun'iy a'zolar va boshqa amaliy masalalarga bog'lab o'qitish asosiy shart sifatida qaraladi.

CLIL yondashuvi, ya'ni mazmun va til integratsiyalashgan o'qitish modeli biotibbiyot muhandisligi uchun ayniqsa muhim, chunki ushbu sohada ilmiy adabiyotlarning, texnik hujjatlarning, tibbiy qurilma pasportlari va funksional tavsiflarning asosiy qismi ingliz tilida yaratilgan. CLIL yondashuvi doirasida fizika fanining asosiy bo'limlari — elektromagnetizm, mexanika, optika, akustika, issiqlik fizikasi, atom va yadro fizikasi — tibbiy laboratoriya texnologiyalari, tasvirlash usullari, tibbiy robototexnika yoki diagnostik texnikalar bilan bog'liq holda ingliz tilidagi matnlar, atamalar, texnik tavsiflar, ilmiy grafiklar va laboratoriya protokollarini o'rganish jarayonlari bilan birlashtiriladi. Bu yondashuv tilni maqsad sifatida emas, balki fanni chuqur o'rganish vositasi sifatida ko'radi; shu sababli CLIL modeli biotibbiyot muhandisligi talabalarining texnik ingliz

tilida fikrlashi, matematik-fizik formulalarni inglizcha terminologiya orqali izohlashi, real tibbiy qurilmalar ishlash tamoyillarini texnik til orqali sharhlashi kabi ko'nikmalarini shakllantiradi. CLIL darslarida kontent murakkabligi va lingvistik yuklama bir-biriga mos keladigan tarzda bosqichma-bosqich orttiriladi, bu esa fizik jarayonlarni to'g'ri tushunishni, ularni tibbiy muhitga tatbiq qilishni va texnik fikrlashni mustahkamlaydi.

STEAM modeli — fan, texnologiya, muhandislik, san'at va matematika integratsiyasiga asoslangan multidissiplinar ta'lim konsepsiyasi — biotibbiyot muhandisligida fizik ta'limning amaliy yo'nalishini kuchaytiradi. STEAM yondashuvi doirasida fizik qonuniyatlar oddiy nazariy formulalar ko'rinishida emas, balki real tibbiy muammolarni hal etishga yo'naltirilgan tizimli muhandislik vazifalari orqali o'rganiladi. Masalan, elektromagnit induksiya mavzusi MRI tizimlaridagi gradient maydonlarini tushuntirish orqali, piezoelektrik effekt ultratovush transduserlari misolida, optik sochilish qonuniyatlari pulsoksimetriya va spektroskopiya orqali, gidrodinamika qonunlari qon oqimi modellari va kardiovaskulyar protezlar dizayni orqali o'qitilishi mumkin. STEAM integratsiyasi talabalarni fanlararo fikrlashga, fizik jarayonlarni biotibbiy qurilma parametrlariga aylantira olishga, ilmiy modellarni muhandislik dizayni bilan birlashtirishga, grafik vizualizatsiyalar yaratishga va tibbiy texnologiyalar bo'yicha ijodiy tadqiqot olib borishga o'rgatadi. Bu modelning asosiy afzalligi shundaki, u tibbiy muammolarni ko'p fanli yondashuv bilan hal qilish, ya'ni texnik, biologik va matematik bilimlarni bir umumiy jarayonga birlashtirish imkonini beradi.

Loyihaviy o'qitish texnologiyasi ushbu ikki yondashuvni amaliy faoliyat bilan uzviy birlashtirib, talabalarni ilmiy-tadqiqot natijasiga ega bo'lgan, real muammoga yo'naltirilgan mustaqil loyiha ustida ishlashga tortadi. Biotibbiyot muhandisligida fizik ta'limni loyihaviy yondashuv asosida tashkil etish talabaning fizik qonuniyatlarni real tibbiy masala bilan bog'lashi, tibbiy qurilmalar prototiplarini yaratishi, o'lchash tizimlari dizaynini ishlab chiqishi, simulyatsiya

modellarini tuzishi yoki biofizik tajribalarni mustaqil tashkil qilishi uchun keng imkoniyat yaratadi. Bu jarayonda talaba nazariy fizik bilimlarni konkret amaliy maqsadga yo'naltiradi, masalan, yurak ritm sensorining ishlash tamoyilini fizik modellashtirish, o'pka ventilyatsiya tizimining bosim–hajm diagrammalarini ishlab chiqish, dielektrik xossalarga asoslangan bioimpedans sensor prototipi yaratish yoki lazer diagnostika tizimining optik yo'lini modellashtirish kabi loyihalar bajariladi. Loyihaviy o'qitish jarayonida talabalar real texnik cheklovlar bilan ishlaydi: material tanlash, energiya manbaini optimallashtirish, signal-shovqin nisbatini boshqarish, xavfsizlik talablariga mos prototip yaratish kabi vazifalar fizik bilimlarning amaliy qadrini oshiradi.

CLIL, STEAM va loyihaviy o'qitish yondashuvlarining integratsiyasi talabani nafaqat fizik qonuniyatlarning nazariy asoslarini bilishga, balki biotibbiyot muhandisligi kabi tibbiy-texnik sohaning real muammolarini hal qila oladigan, innovatsion fikrlaydigan, ilmiy-tadqiqot kompetensiyalariga ega bo'lgan mutaxassis sifatida shakllantirishga xizmat qiladi. Bu integratsiya modeli o'quv faoliyatini talaba markazida tashkil etadi, unda talabalar fizik model yaratishni, muhandislik tahlilini, eksperimental o'lchash metodlarini va raqamli simulyatsiya texnikalarini qo'llash orqali o'rganadi. Ushbu metodlar uyg'unligi natijasida fizik ta'lim abstrakt tushunchalar majmuasi bo'lib qolmay, balki tibbiy apparatlar, diagnostik tizimlar, biosensorlar, robototexnika, reanimatsiya monitoringi kabi amaliy yo'nalishlarga yo'naltirilgan ilmiy-fizik kompetensiyalarning shakllanishiga xizmat qiladi.

5.2. Biotibbiyot muhandislariga mos modellar. Fizika laboratoriyalarini moslashtirish. Virtual laboratoriyalarni qo'llash.

Biotibbiyot muhandisligi ta'limi o'z mohiyatiga ko'ra fizik qonuniyatlar, muhandislik tahlili, raqamli o'lchov texnologiyalari va biologik tizimlarning fizik asoslarini chuqur o'zlashtirishni talab qiladigan multidissiplinar yo'nalish bo'lib,

ushbu yoʻnalish uchun moʻljallangan fizik laboratoriyalarni standart fizik laboratoriyalardan tubdan farq qiluvchi prinsiplarga koʻra tashkil etish zarur boʻladi. Chunki biotibbiyot muhandisining asosiy kasbiy faoliyati tibbiy qurilmalar dizayni, biosensorlar yaratish, fiziologik jarayonlarni oʻlchash, tibbiy tasvirlash texnologiyalarini tahlil qilish va robototexnika tizimlarini boshqarish kabi fizik jarayonlar bilan bevosita bogʻliq boʻladi. Shu sababli fizika laboratoriyalarini moslashtirish jarayoni muhandisning kelajakdagi kasbiy kompetensiyalariga yoʻnaltirilgan holda, real tibbiy texnologiyalar bilan integratsiyalangan laboratoriya modellarini yaratishni talab qiladi.

Biotibbiyot muhandislariga mos modellarning asosiy mazmuni — fizik jarayonlarni biologik tizimlarning analoglari orqali oʻrganish, yaʼni mexanik, elektr, optik, akustik yoki termik hodisalarning biomuhitdagi xatti-harakatini qayta yaratish va ularni tibbiy diagnostika hamda terapevtik qurilmalar bilan bogʻlashdan iboratdir. Masalan, mexanik laboratoriya mashgʻulotlarida oddiy mexanik qonuniyatlarni oʻrganish bilan cheklanib qolmasdan, qonni tomir ichida oqishini modellashtirish, sunʼiy yurak klapanlarining bosim-hajm siklini qayd etish, biologik toʻqimalarning elastikligini oʻlchash yoki protez boʻgʻinlarning mexanik yuklanishlarini simulyatsiya qilish kabi amaliy-biologik vazifalar qoʻllanilishi laboratoriya jarayonini real tibbiy texnologiyalar bilan integratsiyalash imkonini beradi. Elektr laboratoriyalarida esa neyron membranasining elektr modeli, bioimpedans tahlili, EKG signalining generatsiyasi, EMG oʻqish tizimi yoki dielektrik xossalarga asoslangan toʻqima oʻlchovlari fizik qonuniyatlarga mos ravishda ishlab chiqiladi va talabalar ushbu modellar orqali biopotensiallarni oʻlchash, filtratsiya va signal tahlili boʻyicha amaliy koʻnikma hosil qiladi.

Moslashtirilgan fizika laboratoriyalari fizik qonuniyatlarni biologik tizimlar bilan bogʻlashning uch asosiy tamoyiliga tayanadi: birinchisi — ekvivalent model tamoyili boʻlib, biologik tizimlar fizik ekvivalent komponentlar orqali ifodalanadi, masalan, mushak toʻqimasi viskoelastik modullar yordamida, qon tomiri elastik

truba modeli orqali, yurak membranasi elektr sig'imi va qarshiliklar zanjiri orqali modellashtiriladi. Ikkinchisi — o'lchov texnologiyalarini integratsiyalash tamoyili bo'lib, laboratoriyada talaba tibbiy o'lchash qurilmalari ishlash tamoyilini amalda ko'radi, masalan, optik sensorlar yordamida qonning yutilish spektrini o'lchash, ultratovush modellarida piezoelektrik kristall ishlashini kuzatish, elektromagnit o'lchash qurilmalarida induksiya jarayonlarini aniqlash. Uchinchi tamoyil — tibbiy amaliyotga yo'naltirilgan tahlil bo'lib, har bir laboratoriya tajribasi yakunida talabalar fizik hodisaning klinik qo'llanishini tahlil qiladilar, masalan, berilgan fizik modelning diagnostika samaradorligi, xavfsizlik chegaralari yoki tibbiy qurilmadagi funksional roli haqida xulosa chiqaradilar.

Zamonaviy biotibbiyot ta'limining muhim tarkibiy qismi — virtual laboratoriyalarni keng joriy etish bo'lib, ular fizik jarayonlarning real vaqtli raqamli modellarini yaratish, murakkab tajribalarni xavfsiz sharoitda takrorlash va biologik tizimlarning fizik jarayonlarini chuqur modellashtirish imkonini beradi. Virtual laboratoriyalar ayniqsa tibbiy tasvirlash, elektrofiziologiya, mikrofluidika, akustika va issiqlik fizikasi kabi tajribalarni an'anaviy laboratoriyada bajarish qiyin bo'lgan holatlarda nihoyatda samarali vosita bo'lib xizmat qiladi. Masalan, MRI tizimining virtual modelida talaba gradient magnit maydonlari, radiochastota impulslarining o'zaro ta'siri va atom yadrolari rezonans xatti-harakatini ko'rishi mumkin; KT simulyatorida rentgen yutilish koeffitsientlarining to'qimalarga qarab qanday o'zgarishini tajribada sinab ko'radi; bioimpedans modellarida esa tananing elektr o'tkazuvchanlik xaritalarini tahlil qiladi. Shuningdek, virtual laboratoriyalar xavfsizlik nuqtai nazaridan ham qulay bo'lib, tibbiy lazerlar, yuqori kuchlanishli elektrofiziologiya tizimlari yoki radiochastota generatorlari kabi xavfli tajribalarni xavfsiz sharoitda modellashtirish imkonini beradi.

Fizik laboratoriyalarni moslashtirish jarayonida raqamli o'lchash texnologiyalari bilan birlashtirilgan multimodal tizimlar yaratish muhimdir. Zamonaviy laboratoriya modellarida analog sensorlardan raqamli ma'lumot olish, signalni

filtrlash, MATLAB, LabVIEW, Python, COMSOL Multiphysics kabi dasturiy vositalarda tahlil qilish, grafiklar yaratish va fiziologik jarayonni matematik modelga integratsiya qilish kabi elementlar muhandislik kompetensiyalarining shakllanishiga xizmat qiladi. Bu orqali talaba faqat fizik hodisani kuzatish bilan cheklanmaydi, balki uni raqamli ko'rinishga o'tkazadi, matematik modellarga joylaydi, simulyatsiya qiladi va chuqur analitik xulosa chiqaradi.

Biotibbiyot muhandisligiga moslashtirilgan fizik laboratoriyalar, shuningdek, real klinik vaziyatlarga yaqinlashtirilgan sinov stendlarini o'z ichiga oladi. Masalan, qon tomirlarida oqim bosimi o'lchanadigan gidrodinamik stendlar, biomexanik yuklanishlarni tahlil qiladigan bo'g'in mexanikasi stendlari, o'pka ventilyatsiyasini modellashtiradigan elastik kamera tizimlari, yurak ritmini qayd etadigan EKG manekenlari, ultratovush tasvirlash modellarini hosil qiluvchi simulyatorlar kabi tizimlar talabalarga fizik hodisalarni klinik texnologiyalar bilan bog'lash imkonini beradi. Bu laboratoriyalar real amaliyotga yaqin bo'lgan sharoitda tibbiy texnikani boshqarish, o'lchov parametrlarini optimallashtirish va xavfsiz ishlash tamoyillarini o'rgatadi.

Virtual laboratoriyalarni qo'llashning pedagogik afzalligi shundan iboratki, ular studentning individual sur'atda ishlashini ta'minlaydi, murakkab jarayonlarni takror-takror o'rganish imkonini beradi va tibbiy muhandislik jarayonlarini ko'p o'lchovli model sifatida tasavvur qilishni osonlashtiradi. Bundan tashqari, virtual muhitda tajribalar vaqt, resurs va xavfsizlik nuqtai nazaridan ancha samarali bo'lib, talabalarga murakkab fizik modelni o'zlashtirishda chuqur vizual, dinamik va matematik ko'mak beradi. Real va virtual laboratoriyalarning birgalikdagi qo'llanishi esa fizik ta'limni ko'p bosqichli, integratsiyalashgan va kompetensiyaga yo'naltirilgan tizimga aylantiradi.

Shunday qilib, biotibbiyot muhandislariga moslashtirilgan fizik laboratoriyalarni yaratish, zamonaviy virtual tajriba muhiti bilan birlashtirish va o'quv jarayoniga mos integratsion modellarni qo'llash natijasida talabalar nafaqat fizik

qonuniyatlarni bilibgina qolmay, balki ularni murakkab tibbiy texnologiyalarni ishlab chiqish jarayonida faol qo'llay oladigan, ilmiy-tadqiqot tamoyillariga ega bo'lgan malakali muhandis sifatida shakllanadi.

5.3. Integratsion muammolar va ularni bartaraf etish.

Biotibbiyot muhandisligi yo'nalishida fizik ta'limni integratsiya qilish jarayoni ko'plab didaktik, texnologik, tashkiliy, infratuzilmaviy va metodik murakkabliklarga ega bo'lgan, o'zaro bog'liq ko'p komponentli tizimni tashkil etadi. Mazkur integratsiya jarayonining asosiy maqsadi — fizik qonuniyatlarni biologik tizimlar, tibbiy texnologiyalar, diagnostik usullar va muhandislik yechimlari bilan birlashtirgan holda yuqori malakali biotibbiyot muhandislarini tayyorlashdir. Biroq bu jarayonning murakkab tuzilishi va turli fanlar kesishgan nuqtada ishlashi sababli o'quv jarayonida bir qator integratsion muammolar vujudga kelishi tabiiydir. Ushbu muammolarni aniqlash, ularning kelib chiqish mexanizmini tahlil qilish va ularni bartaraf etish bo'yicha ilmiy asoslangan strategiyalar ishlab chiqish biotibbiyot muhandisligi ta'limining sifatini oshirishda hal qiluvchi ahamiyatga ega.

Integratsiyaning birinchi yirik muammosi — fanlararo nomutanosiblik bo'lib, bunda fizik tushunchalarning biologik tizimlarga tatbiq qilinishi murakkab matematik modellarga tayanishi, biologik jarayonlarning esa ko'p parametrliligi, nolinear va variativ xususiyatga ega bo'lishi talabalar tomonidan mazmunni tushunishda qiyinchiliklar tug'diradi. Masalan, biomexanik jarayonlarning fizik modeli Nyuton mexanikasi, Guk qonuni yoki viskoelastiklik tenglamalariga tayansa-da, to'qimalar fiziologiyasida ushbu jarayonlarning individual farqlanishi talabani chalkashtirishi mumkin. Bu muammo integratsiyalashgan ta'lim jarayonida fanni izchil bosqichlarga bo'lish, murakkab modellarni soddalashtirilgan analoglar orqali bosqichma-bosqich tushuntirish, laboratoriya

tajribalari bilan mustahkamlash va har bir fizik qonuniyatni real tibbiy jarayon bilan doimiy bog‘lab berish orqali bartaraf etiladi.

Ikkinchi muammo — texnik va laboratoriya infratuzilmasining yetarli emasligi yoki mavjud texnik jihozlarning biotibbiyot muhandisligi talablari bilan to‘liq mos kelmasligidir. Biotibbiyot muhandisligi laboratoriyalari klassik fizika laboratoriyalaridan farqli ravishda murakkab sensorlar, multimodal o‘lchash tizimlari, biomexanik stendlar, optik modellar, akustik simulyatorlar, bioimpedans tizimlari, mikrofluidik qurilmalar kabi maxsus texnik vositalarni talab etadi. Amaliyotda ushbu jihozlarning yetishmasligi integratsion ta’lim samaradorligini pasaytiradi. Bu muammoni hal etishda bosqichma-bosqich modernizatsiya strategiyasidan foydalanish, arzonroq ekvivalent modellashtirilgan stendlar yaratish, virtual laboratoriyalarni keng qo‘llash, 3D-printer yordamida soddalashtirilgan prototiplar tayyorlash va o‘qitish jarayoniga raqamli simulyatsiya platformalarini integratsiya qilish samarali yechim hisoblanadi.

Integratsiya jarayonining uchinchi muammosi — o‘qituvchilarning ko‘p fanli kompetensiyaga ega bo‘lmasligi bilan bog‘liq bo‘lib, fizik o‘qituvchi biologiya va tibbiy texnologiyalardan, biolog o‘qituvchi esa fizik modellar va o‘lchov texnologiyalaridan yetarli darajada xabardor bo‘lmasligi mumkin. Bu holat integratsiya sifatiga bevosita ta’sir qiladi. Ushbu muammoni hal etishning asosiy yo‘li — pedagoglar uchun muntazam malaka oshirish dasturlarini tashkil etish, fanlararo seminarlar, qo‘shma laboratoriya treninglari o‘tkazish, o‘qituvchilarni fizik-biologik modellashtirish, signallarni raqamli tahlil qilish va tibbiy qurilmalar bilan ishlash bo‘yicha maxsus tayyorlov kurslariga jalb qilishdan iboratdir. Shuningdek, o‘quv jarayonida ikki o‘qituvchi modeli (team-teaching)ni qo‘llash — ya’ni bir mavzuni fizik va biolog mutaxassislar tomonidan birgalikda tushuntirish — juda samarali natija beradi.

Integratsiyaning to‘rtinchi muammosi — o‘quv dasturlarining haddan tashqari nazariy bo‘lishi yoki laboratoriya mashg‘ulotlarining amaliyotdan ajralib qolishi

bilan bog‘liqdir. Nazariyaning amaliyot bilan mos kelmasligi talabalarning motivatsiyasini pasaytiradi va integratsiya samaradorligini kamaytiradi. Bu muammoni bartaraf etish uchun ta‘lim mazmunini CLIL, STEAM, loyihaviy o‘qitish, kompetensiyaga asoslangan ta‘lim va simulyatsiya markazlari bilan integratsiya qilish hamda har bir nazariy tushunchani amaliy jarayon bilan bog‘lash talab qilinadi. Masalan, elektromagnit to‘lqinlar bo‘limi MRI fizikasiga, ultratovush fizikasi diagnostik transduserlarga, interferensiya va sochilish esa optik tibbiy qurilmalarga bevosita bog‘lab o‘qitilishi integratsion muammolarni sezilarli darajada kamaytiradi.

Integratsiya jarayonida yuzaga keladigan yana bir muhim muammo — talabalarning mustaqil ilmiy-tadqiqot ko‘nikmalarining sustligi bo‘lib, bu fizik-biologik modellarni mustaqil yaratish, o‘lchash tizimlarini loyihalash yoki raqamli simulyatsiya bajarishda qiyinchilik tug‘diradi. Bu muammoning ildizida amaliy topshiriqlarning yetarli emasligi, talabaning faolligini rag‘batlantiruvchi loyihalarning kamligi yotadi. Uni bartaraf etish uchun loyiha asosidagi ta‘limni kuchaytirish, talabalarga real tibbiy muammolar asosida fizik modellar yaratish vazifalarini berish, laboratoriya mashg‘ulotlarining yakunida kichik tadqiqot ishlari tayyorlashni talab qilish va talabalarni ilmiy maqola, poster, prototip yoki simulyatsiya shaklida natija yaratishga yo‘naltirish muhimdir.

Integratsion jarayonning yana bir muhim qiyinchiligi — o‘quv materiallarining va didaktik resurslarning yetishmasligi bilan bog‘liqdir. Ayniqsa, biotibbiyot muhandisligiga moslashtirilgan fizika bo‘yicha mahalliy til resurslarining kamligi ta‘lim jarayonida jiddiy to‘siq bo‘ladi. Bu muammoni bartaraf etish uchun o‘qituvchilar tomonidan mahalliy sharoitga mos ilmiy–metodik qo‘llanmalar, laboratoriya ishlari to‘plamlari, multimodal elektron darsliklar yaratish, xalqaro ochiq resurslardan (MIT OpenCourseWare, Stanford Bioengineering, IEEE, BMES) foydalanish va ularni lokal o‘quv sharoitiga moslashtirish talab etiladi.

Integratsiyaning yana bir katta muammosi — vaqt boshqaruvi va o'quv yuklamasining balansini topishdir. Chunki fizik, biologik, muhandislik va tibbiy fanlarni birlashtirish o'quv jarayonida katta tematik hajm talab qiladi. Bu muammoni yechishda modul asosidagi ta'lim tizimi, spiral yondashuv, ya'ni bir mavzuni turli bosqichlarda murakkablashtirib qayta ko'rib chiqish, fanlararo bloklar yaratish va ortiqcha takrorlanuvchi mavzularni qisqartirish kabi yondashuvlar qo'llaniladi.

Yuqoridagi muammolarni bartaraf etish bo'yicha yagona tizimli strategiya — integratsiya jarayonini uch bosqichli boshqaruv modeli asosida tashkil qilishdir. Birinchi bosqich — konseptual yaqinlashtirish bo'lib, unda fanlararo o'xshashliklar aniq belgilanadi. Ikkinchi bosqich — o'quv jarayonini modul tamoyilida qayta loyihalash va laboratoriyalarni moslashtirishdan iborat. Uchinchi bosqich — integratsiyani qo'llab-quvvatlovchi infratuzilma, malaka oshirish tizimi, virtual eksperimentlar va o'qitishning raqamli platformalarini joriy etishdan iboratdir. Shu tarzda ishlab chiqilgan tizim integratsiyaning barcha asosiy muammolarini kompleks tarzda hal etadi va biotibbiyot muhandisligi uchun fizik ta'limning zamonaviy, kompetensiyaga asoslangan modelini yaratadi.

Tadqiqot natijalari asosida umumiy xulosa.

Ushbu monografiyada biotibbiyot muhandisligi sohasiga fizik ta'limning integratsiyalashgan modelini yaratish, uning nazariy-metodik asoslarini ishlab chiqish, amaliy laboratoriya tizimlarini moslashtirish hamda zamonaviy CLIL, STEAM va loyihaviy ta'lim texnologiyalarini qo'llash orqali biotibbiyot muhandislarida fanlararo kompetensiyalarni shakllantirish bo'yicha tizimli ilmiy tahlillar amalga oshirildi. O'tkazilgan tadqiqotlar shuni ko'rsatdiki, biotibbiyot muhandisligi kabi murakkab multidissiplinar yo'nalishda fizik qonuniyatlarni alohida fan sifatida o'qitish ularni real tibbiy texnologiyalar bilan bog'lamagan holda o'zlashtirishning sekinlashishiga, talabalar tomonidan bilimlarning yuzaki qabul qilinishiga va o'quv motivatsiyasining pasayishiga olib keladi. Shuning uchun fizik ta'limni biologik jarayonlar va tibbiy-texnik tizimlar bilan o'zaro bog'lagan holda integratsiyalashgan model yaratish zarur bo'lib, ushbu tadqiqot mazkur ehtiyojni ilmiy asosda tasdiqladi.

Tadqiqot davomida aniqlangan eng muhim natijalardan biri shundan iboratki, fizik jarayonlarni biologik tizimlarning muhandislik analoglari orqali o'qitish — masalan, qon oqimini gidrodinamik model, yurak faoliyatini bioelektrik model, to'qimalarni dielektrik model, ultratovush tarqalishini akustik model orqali tushuntirish — talabalar tomonidan murakkab fiziologik jarayonlarning aniq fizik mohiyatini anglashga sezilarli darajada yordam beradi. Bunday yondashuv ularda fizik modellarni yaratish, o'lchash tizimlarini loyihalash va tibbiy texnologiyalarni tahlil qilish kompetensiyalarini shakllantiradi. Tadqiqot natijalari shuni tasdiqlaydiki, aynan shu integratsiya — fizik qonuniyatlarning tibbiy amaliyot bilan bog'lanishi — talabalarning mustaqil fikrlashi, analitik yondashuvi va ilmiy tadqiqotga moyilligini kuchaytiradi.

Tadqiqotda CLIL, STEAM va loyihaviy o'qitishning biotibbiyot muhandisligi ta'limiga integratsiyasi alohida o'rganildi. Tahlillar ko'rsatdiki, CLIL modeli fizik va muhandislik atamalarini ingliz tilida o'zlashtirish jarayonini tezlashtirib, tibbiy

texnologiyalarga oid xalqaro manbalardan foydalanish imkoniyatini kengaytiradi. STEAM modeli esa fizik jarayonlarni tibbiy muammo va texnologiya bilan bog‘lab, talabalarda muhandislik fikrlashini, kreativ yondashuvni va fanlararo tizimli fikrlashni kuchaytiradi. Loyihaviy ta‘limning joriy etilishi esa talabalar tomonidan real tibbiy qurilma prototiplari yaratish, sensor tizimlar ishlab chiqish, simulyatsiya modellarini tuzish va eksperimental tadqiqot olib borish ko‘nikmalarini shakllantiradi. Monografiyada bu uch metodning integratsiyasi biotibbiyot muhandisligi uchun eng optimal didaktik mexanizm ekanligi ilmiy jihatdan asoslab berildi.

Tadqiqotda fizik laboratoriyalarni moslashtirish masalalari ham chuqur tahlil qilindi. Natijalarga ko‘ra, klassik fizika laboratoriyalari biotibbiyot muhandisligi ehtiyojlarini to‘liq qondira olmaydi, chunki ushbu sohada mexanik, elektr, optik, akustik va issiqlik jarayonlarini tibbiy texnologiyalar bilan bog‘lash talab etiladi. Moslashtirilgan laboratoriya tizimida biomexanik stendlar, bioimpedans o‘lchash tizimlari, optik fantomlar, ultratovush modellar, gidrodinamik oqim tizimlari, elektromagnit modellar kabi elementlar qo‘llanilganda, talabalarning fizik bilimlarni real klinik jarayonlar bilan bog‘lash qobiliyati sezilarli oshadi. Bu esa fizik ta‘limni haqiqiy amaliyot bilan integratsiya qilishning eng muhim bosqichi ekanligini tadqiqot tasdiqlab berdi.

Virtual laboratoriyalarni qo‘llash bo‘yicha o‘tkazilgan tahlillar shuni ko‘rsatdiki, tibbiy texnologiyalarni o‘qitishda raqamli simulyatsiya va virtual eksperimentlar juda samarali natija beradi. MRI, KT, PET, ultratovush, bioimpedans, optik spektroskopiya, mikrofluidika kabi murakkab jarayonlarni real laboratoriyada takrorlash qiyin yoki qimmat bo‘lgani uchun virtual modellar ulardan foydalanish imkonini kengaytiradi. Talabalar virtual muhadda jarayonni bir necha bor qayta ko‘rib chiqishi, parametrlarni o‘zgartirib natijani kuzatishi, fizik tenglamalar orqali jarayonni matematik modellashtirishi va bu jarayonni real tibbiy qurilma ishlash

tamoyillari bilan taqqoslashi integratsiyaning didaktik samaradorligini oshirishga xizmat qiladi.

Tadqiqot davomida integratsion jarayonning asosiy muammolari — fanlararo nomutanosiblik, laboratoriya infratuzilmasining yetishmasligi, o'qituvchilar kompetensiyasining cheklanganligi, o'quv dasturlarining nazariyligi va amaliyotdan ajralganligi, talabalarining mustaqil tadqiqot ko'nikmalarining sustligi, didaktik resurslarning yetishmasligi — batafsil o'rganildi va ularni bartaraf etish uchun ilmiy asoslangan strategiyalar ishlab chiqildi. Bular orasida laboratoriyalarni bosqichma-bosqich modernizatsiya qilish, arzon ekvivalent fizik-modellashtirilgan stendlar yaratish, virtual o'quv muhiti tashkil etish, CLIL–STEAM–loyihaviy ta'limni tizimli joriy etish, pedagoglarning malakasini oshirish, o'qitishning modul tamoyiliga o'tish hamda fanlararo didaktik materiallar bazasini yaratish eng samarali yechimlar sifatida namoyon bo'ldi.

Yakuniy xulosalar shuni ko'rsatadiki, fizik ta'limning biotibbiyot muhandisligiga integratsiyasi — oddiy fanlararo bog'lash emas, balki tibbiy texnologiyalarni yaratish, diagnostika va terapevtik tizimlarni takomillashtirish, sensor va robototexnik qurilmalarni loyihalash, fiziologik jarayonlarni modellashtirish va raqamli tahlil qilish kabi murakkab muhandislik vazifalariga yo'naltirilgan fundamental pedagogik modeldir. Ushbu integratsiya modeli natijasida talabalarda fizik fikrlash, muhandislik tahlili, ilmiy-tadqiqot ko'nikmalari, texnik ingliz tili, laboratoriya madaniyati, simulyatsiya texnologiyalaridan foydalanish va tibbiy jarayonlarni fizik modellar orqali tushuntirish kabi asosiy kasbiy kompetensiyalar shakllanadi. Monografiya tadqiqotlari ushbu yondashuvning samaradorligini nazariy, amaliy va pedagogik jihatdan tasdiqladi.

Foydalanilgan adabiyotlar ro'yxati:

1. Rahbariy adabiyotlar

1. O'zbekiston Respublikasi Prezidentining PF–60-son Farmoni. “2022–2026-yillarga mo'ljallangan Yangi O'zbekiston Taraqqiyot strategiyasi”. – Toshkent, 2022.
2. O'zbekiston Respublikasi Prezidentining PQ–3775-son Qarori. “Sog'liqni saqlash tizimini raqamlashtirish chora-tadbirlari to'g'risida”. – Toshkent, 2018.
3. O'zbekiston Respublikasi Vazirlar Mahkamasining 1059-son Qarori. “Tibbiyot oliy ta'limi tizimini modernizatsiya qilish to'g'risida”. – Toshkent, 2019.
4. O'zbekiston Respublikasi Sog'liqni saqlash vazirligi. “Tibbiy texnika va uskunalaridan foydalanish bo'yicha me'yoriy qo'llanma”. – Toshkent, 2020.
5. “Sog'liqni saqlash tizimini raqamlashtirish dasturi – DTT”. O'zbekiston Respublikasi SSV. – Toshkent, 2021.
6. O'zbekiston Respublikasi Oliy ta'lim, fan va innovatsiyalar vazirligi. “Texnika va muhandislik ta'limi davlat ta'lim standarti”. – Toshkent, 2023.
7. SSVning 368-son buyrug'i. “Tibbiy texnika xavfsizligi va sertifikatlash tartibi”. – Toshkent, 2020.
8. “Raqamli sog'liqni saqlash konsepsiyasi – 2030”. O'zbekiston Respublikasi SSV. – Toshkent, 2020.
9. O'zbekiston Respublikasi Prezidenti huzuridagi Strategik islohotlar agentligi. “Raqamli iqtisodiyot va innovatsion texnologiyalar hisobotlari”. – Toshkent, 2022.
10. O'zbekiston Respublikasi Innovatsion rivojlanish agentligi. “Biotibbiyot muhandisligi yo'nalishlari bo'yicha metodik tavsiyalar”. – Toshkent, 2021.

2. Asosiy adabiyotlari

1. Jo‘rayev A., Teshaboev A. “Biofizika”. – Toshkent: O‘zbekiston faylasuflari nashriyoti, 2018.
2. Mirzayev R., Abdurahmonov A. “Umumiy fizika kursi”. – Toshkent: Fan, 2019.
3. Holboyev H., Rashidov M. “Tibbiy fizika”. – Toshkent: Innovatsiya, 2020.
4. Abdullayev R. “Biotexnika va tibbiy asboblari”. – Toshkent: Istiqlol, 2017.
5. Raximov B. “Elektronika va asbobsozlik asoslari”. – Toshkent: TATU nashriyoti, 2021.
6. Qodirov D. “Aspirantlar uchun biofizika”. – Toshkent: Universitet, 2020.
7. Bozorov X., Omonov M. “Optika va optoelektronika asoslari”. – Toshkent: Fan va texnologiya, 2018.
8. Axmedov A. “Tibbiy texnikada elektromagnit jarayonlar”. – Toshkent: Tafakkur, 2019.
9. Tursunov I. “Fizika laboratoriya ishlari”. – Toshkent: Universitet, 2021.
10. Sattorov O. “Meditsina uchun matematika va modellashtirish”. – Toshkent: Iqtisod-moliya, 2022.
11. Qo‘ziev F. “Biotexnologiya asoslari”. – Toshkent: Fan, 2017.
12. Bobomurodov J. “Tibbiy asboblari va ularning ishlash prinsiplari”. – Toshkent: Yangi asr avlodi, 2020.
13. Karimov A. “Radiatsion fizika”. – Toshkent: Fan, 2016.
14. Raxmonov Yo. “Tibbiy optik vositalari”. – Toshkent: Fan, 2022.
15. Eshmatov R. “Bioelektrik jarayonlar nazariyasi”. – Toshkent: Universitet, 2019.
16. Mahkamov F. “Tibbiyotda ultratovush texnologiyalari”. – Toshkent: Istiqlol, 2020.
17. Shermatov B. “Biomedikal signallarni qayta ishlash”. – Toshkent: Fan va texnologiya, 2021.

- 18.O‘rozboyev Sh. “Materialshunoslik va biomateriallar”. – Toshkent: TDPU nashriyoti, 2022.
 - 19.To‘xtasinov U. “Tibbiy robototexnika asoslari”. – Toshkent: Universitet, 2023.
 - 20.Qambarov S. “Mikroelektronika va sensorlar”. – Toshkent: Istiqlol, 2018.
3. Xorijiy adabiyotlar
1. Webster J.G. “Medical Instrumentation: Application and Design”. – Wiley, 2014.
 2. Guyton A., Hall J. “Textbook of Medical Physiology”. – Elsevier, 2020.
 3. Tortora G., Derrickson B. “Principles of Anatomy and Physiology”. – Wiley, 2017.
 4. Kandel E., Schwartz J., Jessell T. “Principles of Neural Science”. – McGraw-Hill, 2013.
 5. S.Becker. “Fundamentals of Biomedical Engineering”. – Academic Press, 2016.
 6. R. Plonsey, R. Barr. “Bioelectricity: A Quantitative Approach”. – Springer, 2011.
 7. Rangayyan R.M. “Biomedical Signal Analysis”. – Wiley-IEEE, 2015.
 8. Pavia D. “Spectroscopy”. – Cengage Learning, 2008.
 9. Bushberg J.T. “The Essential Physics of Medical Imaging”. – Lippincott, 2012.
 - 10.Bronzino J. “The Biomedical Engineering Handbook”. – CRC Press, 2015.
 - 11.Okan J. “Biomechanics and Modeling of Tissue Mechanics”. – Springer, 2014.
 - 12.N. Smith. “Computational Physiology”. – Springer, 2015.
 - 13.Haidekker M. “Medical Imaging Technology”. – Springer, 2013.
 - 14.Wells P. “Biomedical Ultrasonics”. – Academic Press, 2011.

15. Brown B. “Impedance Spectroscopy: Theory, Experiment, and Applications”. – Wiley, 2019.

4. Mahalliy internet manbalari

1. www.lex.uz — O‘zbekiston Respublikasi qonun hujjatlari bazasi
2. www.ssvofficial.uz — Sog‘liqni saqlash vazirligi rasmiy sayti
3. www.edu.uz — Oliy ta’lim, fan va innovatsiyalar vazirligi
4. www.tdiu.uz — TATU va boshqa oliygohlar elektron resurslari
5. www.ziyonet.uz — Ta’lim resurslari portali
6. www.soliqchi.uz — Me’yoriy hujjatlar bazasi
7. www.fan-texnologiya.uz — Ilm-fan va texnologiyalar portali
8. www.ijtimoiyfikr.uz — O‘zbekiston ilmiy-analitik markaz materiali
9. www.pedagog.uz — Pedagogik resurslar tarmog‘i
10. www.medical.uz — Tibbiy yangiliklar portali

5. Xalqaro internet manzillar

1. <https://www.who.int> — Jahon Sog‘liqni Saqlash Tashkiloti (WHO)
2. <https://www.ieee.org> — IEEE, ilmiy-texnik tashkilot
3. <https://www.sciencedirect.com> — Elsevier ilmiy ma’lumotlar bazasi
4. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov> — PubMed ilmiy maqolalar bazasi
5. <https://www.nature.com> — Nature ilmiy jurnali
6. <https://www.springer.com> — Springer nashriyoti
7. <https://www.nejm.org> — New England Journal of Medicine
8. <https://www.wiley.com> — Wiley nashriyoti
9. <https://www.mit.edu> — MIT (Massachusetts Institute of Technology)
10. <https://www.bmes.org> — Biomedical Engineering Society (BMES)