QATTIQ JISMLARNING VA BIOLOGIK TO‘QIMALARNING YUNG MODELINI ANIQLASH

Buzrukov To‘lqin Omonivich-Termiz Iqtisodiyot va servis universiteti p.f.f.d PhD, dotsent.Email:tolqinbuzrukov5@gmail.com

Соатмуродова шахноза Собир кизи-Termiz Iqtisodiyot va servis universiteti talabasi.Email: Soatmurodovash08@gmail.com

Annotatsiya

Ushbu maqola qattiq jismlar va biologik to‘qimalarning Yung modulini aniqlash usullarini o‘rganadi. Yung moduli materiallarning mexanik xususiyatlarini, xususan, ularning elastik deformatsiyaga qarshiligini tavsiflovchi muhim parametr hisoblanadi. Tadqiqotda turli eksperimental yondashuvlar, jumladan, statik va dinamik sinovlar tahlil qilinadi. Biologik to‘qimalar uchun ushbu parametrni aniqlashning o‘ziga xos qiyinchiliklari va ularni yechish yo‘llari muhokama qilinadi. Olingan natijalar materialshunoslik, muhandislik va biomexanika sohalarida keng qo‘llanilishi mumkin.

Kalit so'zlar: Yung moduli, Qattiq jismlar, Biologik to‘qimalar, Mexanik xususiyatlar, Elastiklik, Deformatsiya, Biomexanika, Materialshunoslik

Abstract

This article investigates methods for determining the Young's modulus of solid bodies and biological tissues. Young's modulus is a crucial parameter characterizing the mechanical properties of materials, particularly their resistance to elastic deformation. The study analyzes various experimental approaches, including static and dynamic testing methods. Specific challenges in determining this parameter for biological tissues and potential solutions are discussed. The obtained results can be widely applied in materials science, engineering, and biomechanics.

Keywords: Young's Modulus, Solid Bodies, Biological Tissues, Mechanical Properties, Elasticity, Deformation, Biomechanics, Materials Science

Аннотация

Данная статья исследует методы определения модуля Юнга твердых тел и биологических тканей. Модуль Юнга является критически важным параметром, характеризующим механические свойства материалов, в частности их сопротивление упругой деформации. В исследовании анализируются различные экспериментальные подходы, включая статические и динамические методы испытаний. Обсуждаются специфические трудности определения этого параметра для биологических тканей и пути их решения. Полученные результаты могут найти широкое применение в материаловедении, инженерии и биомеханике.

Ключевые слова: Модуль Юнга, Твердые Тела, Биологические Ткани, Механические Свойства, Упругость, Деформация, Биомеханика, Материаловедение

Kirish

Yung moduli, elastiklik moduli sifatida ham tanilgan bo‘lib, materiallarning elastik xususiyatlarini tavsiflovchi fundamental mexanik parametrdir. U materialning kuchlanish yoki bosim ostida uzunligini o‘zgartirishga qarshiligini miqdoriy jihatdan ifodalaydi [1]. Ayniqsa, metall novdalar kabi qattiq jismlar uchun muhim bo‘lib, ularning yuk ostida deformatsiyaga uchraganda asl holatiga qaytish qobiliyatini baholashda asosiy mezon hisoblanadi. Yung moduli kuchlanish deformatsiyaga mutanosib bo‘lgan va material elastik chegaralar ichida harakat qilgan holatlarda aniq natijalar beradi [1]. Zamonaviy sinov mashinalari va maxsus dasturiy ta’minot integratsiyasi tufayli uni hisoblash jarayoni sodda, takrorlanuvchan va yuqori aniqlikka ega bo‘ldi [1]. Ko‘pincha cho‘zilish sinovi deb ataladigan bu usul, namunaning o‘q bo‘ylab cho‘zilish yuki ostidagi harakatini aniqlash uchun asosiy mexanik usuldir. Bu sinov natijasida elastiklik chegarasi, cho‘zilish mustahkamligi, oquvchanlik nuqtasi, oquvchanlik mustahkamligi,

uzayish va Yung modulining o‘zi kabi muhim xususiyatlar aniqlanadi [1]. Olmos kabi qattiq materiallar yuqori Yung moduliga ega bo‘lib, elastik yuklar ostida minimal shakl o‘zgarishini ko‘rsatsa, kauchuk kabi egiluvchan materiallar past Yung moduliga ega bo‘lib, sezilarli darajada deformatsiyalanadi [1]. Komponentning qattiqligi materialning Yung modulidan tashqari, uning yuklanish usuli, shakli va o‘lchamiga ham bog‘liqdir [1].

Ushbu tadqiqotning dolzarbligi nafaqat an’anaviy muhandislik materiallari, balki biologik to‘qimalar kontekstida ham Yung modulini aniqlashning muhimligini ta’kidlashdan iborat. Biologik to‘qimalarning mexanik xususiyatlarini tushunish, ularning fiziologik funksiyalarini, patologik o‘zgarishlarini va tibbiy muhandislikdagi qo‘llanilishini (masalan, implantlar dizayni, to‘qimalar muhandisligi) chuqur anglash uchun hal qiluvchi ahamiyatga ega. Masalan, saraton kasalliklarida to‘qimalarning qattiqligi o‘zgarishi diagnostik ahamiyatga ega bo‘lishi mumkin. Qattiq jismlar va biologik to‘qimalarning Yung modulini aniqlash bo‘yicha olib borilayotgan tadqiqotlar materialshunoslik, biomexanika va tibbiyot sohalarida yangi imkoniyatlar ochib beradi. Ushbu parametrni aniq va ishonchli usullar bilan o‘lchash, materiallarning xatti-harakatlarini bashorat qilish, yangi materiallar yaratish va kasalliklarni tashxislash hamda davolash strategiyalarini ishlab chiqishda fundamental asos bo‘lib xizmat qiladi. Shuning uchun, ushbu maqola qattiq jismlar va biologik to‘qimalarning Yung modulini aniqlashning nazariy asoslari, usullari va amaliy ahamiyatini atroflicha ko‘rib chiqishni maqsad qilgan.

Mavzuga oid adabiyotlar tahlili

Yung moduli tushunchasi materialshunoslik va mexanika sohalarida fundamental ahamiyatga ega bo‘lib, uning nazariy asoslari va amaliy qo‘llanilishi bo‘yicha keng qamrovli tadqiqotlar olib borilgan. Kirish qismida ta’kidlanganidek, Yung moduli materialning elastik deformatsiyaga qarshiligini miqdoriy jihatdan ifodalaydi va kuchlanish-deformatsiya egri chizig‘ining elastik mintaqasidagi qiyalik sifatida aniqlanadi [1]. Ushbu parametrning nazariy asoslari Hook

qonuniga borib taqaladi, unga ko‘ra elastik chegaralar ichida kuchlanish deformatsiyaga to‘g‘ridan-to‘g‘ri mutanosibdir. Biroq, ko‘plab materiallar, ayniqsa biologik to‘qimalar, ushbu ideal xatti-harakatdan chetga chiqadi, bu esa ularning mexanik xususiyatlarini aniqlashda murakkabliklarni keltirib chiqaradi [2].

Qattiq jismlarning Yung modulini aniqlash usullari an’anaviy ravishda cho‘zilish sinovlariga asoslanadi, bu usul namunaning o‘q bo‘ylab cho‘zilish yuki ostidagi harakatini aniqlash uchun asosiy mexanik usul hisoblanadi [1]. Zamonaviy tadqiqotlar bu usulni takomillashtirish va yangi texnikalarni joriy etishga qaratilgan. Masalan, dinamik mexanik analiz (DMA) materiallarning harorat va chastotaga bog‘liq elastik va yopishqoq xususiyatlarini aniqlash imkonini beradi, bu esa polimerlar va kompozit materiallar uchun ayniqsa muhimdir [3]. Uch nuqtali egilish sinovi, ayniqsa mo‘rt materiallar va ingichka plyonkalar uchun qo‘llaniladi, bu yerda cho‘zilish sinovlari namunalarni tayyorlashdagi qiyinchiliklar tufayli cheklangan bo‘lishi mumkin [4]. Rezonans usullari, materialning tabiiy tebranish chastotasini o‘lchash orqali Yung modulini aniqlashga imkon beradi, bu esa buzilmaydigan sinov usuli sifatida qadrlanadi [5]. Ushbu usullar materialning mikrostrukturasini, don hajmini va kristallografik yo‘nalishini hisobga olgan holda Yung modulini yanada aniqroq baholashga yordam beradi [6]. Masalan, metall qotishmalarining Yung moduli ularning termal ishlovi va sovitish tezligiga bog‘liq holda sezilarli darajada o‘zgarishi mumkin [7].

Yung modulining amaliy ahamiyati materialshunoslik, muhandislik, tibbiyot va biomexanika sohalarida juda kengdir. Materialshunoslikda, Yung modulini aniq bilish yangi materiallarni loyihalash va ularning yuk ostidagi xatti-harakatlarini bashorat qilish uchun zarurdir [31]. Masalan, yuqori qattiqlikka ega bo‘lgan materiallar aviatsiya va kosmik sanoatda, past qattiqlikka ega bo‘lgan materiallar esa egiluvchan ilovalar uchun qo‘llaniladi [32]. Tibbiyotda, Yung modulini aniqlash kasalliklarni tashxislashda, masalan, jigar fibrozini, ko‘krak bezi saratonini va aterosklerozni baholashda muhim rol o‘ynaydi [33]. To‘qimalarning qattiqligidagi o‘zgarishlar ko‘pincha patologik jarayonlarning dastlabki belgilari

bo‘lishi mumkin [34]. Biomexanikada, implantlar, protezlar va to‘qimalar muhandisligi mahsulotlarini loyihalashda Yung modulini hisobga olish juda muhimdir [35]. Implant materialining Yung moduli atrofdagi biologik to‘qimalarnikiga mos kelishi kerak, aks holda stressni himoyalash (stress shielding) hodisasi yuzaga kelib, suyak rezorbsiyasiga olib kelishi mumkin [36]. To‘qimalar muhandisligida esa, hujayralarning o‘sishi, differensiatsiyasi va funksiyasini boshqarish uchun substratning mexanik xususiyatlari, xususan, Yung moduli muhim ahamiyatga ega [37]. Masalan, ba’zi hujayra turlari ma’lum qattiqlikdagi substratlarda yaxshiroq o‘sadi va differensiatsiyalanadi [38].

Xulosa qilib aytganda, Yung moduli materiallarning mexanik xususiyatlarini tushunishda markaziy parametr bo‘lib, uning qattiq jismlar va biologik to‘qimalar uchun aniqlanishi turli sohalarda chuqur bilim va amaliy yechimlarni taqdim etadi. So‘nggi yillarda biologik to‘qimalarning murakkab viskoelastik, anizotrop va geterogen tabiatini hisobga olgan holda, ularning Yung modulini aniqlash uchun AFM, nanoindentatsiya, elastografiya va reometriya kabi ilg‘or eksperimental texnikalar ishlab chiqilgan [39]. Ushbu usullar nafaqat kasalliklarni invaziv bo‘lmagan tarzda tashxislash, balki yangi biomateriallar va to‘qimalar muhandisligi strategiyalarini ishlab chiqish uchun ham fundamental asos bo‘lib xizmat qilmoqda [40]. Kelajakdagi tadqiqotlar ushbu texnikalarni yanada takomillashtirish, ularning aniqligi va ishonchliligini oshirish, shuningdek, in vivo sharoitida to‘qimalarning mexanik xususiyatlarini real vaqt rejimida kuzatish imkoniyatlarini kengaytirishga qaratilishi lozim [41]. Bundan tashqari, Yung modulini boshqa mexanik parametrlar bilan birgalikda kompleks tahlil qilish materiallarning va biologik tizimlarning xatti-harakatlarini yanada chuqurroq tushunishga olib keladi [42]. Materiallarning va biologik to‘qimalarning mexanik xususiyatlarini modellashtirishda sun’iy intellekt va mashinani o‘rganish usullaridan foydalanish ham ushbu sohada yangi imkoniyatlar ochib berishi kutilmoqda [43]. Ayniqsa, individual bemorlarning to‘qima mexanik xususiyatlarini aniqlash va ularga moslashtirilgan davolash usullarini ishlab

chiqishda bu yondashuvlar katta salohiyatga ega [44]. Ushbu sohadagi uzluksiz tadqiqotlar materialshunoslik, biomexanika va klinik tibbiyotning kelajakdagi rivojlanishi uchun mustahkam poydevor yaratadi [45].

Tadqiqot metodologiyasi

Yung modulini aniqlash bo‘yicha tadqiqot metodologiyasi, materialning turiga qarab, ya’ni qattiq jismlar yoki biologik to‘qimalar bo‘lishiga ko‘ra sezilarli darajada farqlanadi. Har ikki holatda ham asosiy maqsad materialning kuchlanish ostidagi deformatsiyaga qarshiligini aniq va ishonchli tarzda miqdoriy baholashdir. Metodologik yondashuv eksperimental dizayn, namuna tayyorlash, ma’lumotlarni yig‘ish, tahlil qilish va natijalarni validatsiya qilish kabi bosqichlarni o‘z ichiga oladi.

Qattiq jismlarning Yung modulini aniqlashda metodologiya asosan standartlashtirilgan mexanik sinovlarga tayanadi. Cho‘zilish sinovi bu sohadagi eng keng tarqalgan va asosiy usul hisoblanadi [1]. Ushbu sinov uchun namunalar xalqaro standartlarga (masalan, ASTM, ISO) muvofiq, aniq o‘lcham va shakllarda tayyorlanadi. Namuna tayyorlash jarayonida materialning mikrostrukturasiga ta’sir qiluvchi omillar (masalan, sirt ishlovi, kesish usuli) minimallashtirilishi kerak, chunki ular sinov natijalariga ta’sir qilishi mumkin. Sinov mashinasining kalibratsiyasi kuch va siljish o‘lchovlarining aniqligini ta’minlash uchun muntazam ravishda amalga oshiriladi [1]. Sinov jarayonida namuna o‘q bo‘ylab tortiladi va unga qo‘llanilgan kuch hamda yuzaga kelgan deformatsiya (uzayish) real vaqt rejimida qayd etiladi. Kuchlanish-deformatsiya egri chizig‘i hosil qilinadi va Yung moduli egri chiziqning elastik mintaqasidagi qiyalikdan hisoblanadi [1]. Bu jarayon zamonaviy sinov mashinalari va maxsus dasturiy ta’minot yordamida avtomatlashtirilgan bo‘lib, yuqori aniqlik va takrorlanuvchanlikni ta’minlaydi [1]. Dinamik mexanik analiz (DMA) yoki rezonans usullari kabi muqobil usullar qo‘llanilganda, namuna o‘lchamlari va sinov chastotalari materialning xususiyatlariga va tadqiqot maqsadlariga mos ravishda tanlanadi. Ushbu usullar

materialning viskoelastik xususiyatlarini ham aniqlashga imkon beradi, bu esa polimerlar va kompozit materiallar uchun muhimdir.

Biologik to‘qimalarning Yung modulini aniqlash metodologiyasi esa ularning murakkab tabiatini hisobga olgan holda ancha murakkabroqdir. Namuna tayyorlash bosqichi juda muhimdir. To‘qimalar tirik tizimlar bo‘lganligi sababli, ularning mexanik xususiyatlari atrof-muhit sharoitlariga (harorat, pH, gidratatsiya darajasi) juda sezgir. Shuning uchun, to‘qima namunalari fiziologik sharoitlarda (masalan, fiziologik tuzli eritma yoki maxsus ozuqa muhitida) saqlanishi va sinov davomida ham ushbu sharoitlar ta’minlanishi kerak. Haroratni nazorat qilish, namlikni saqlash va to‘qimalarning hayotiyligini ta’minlash uchun maxsus kameralar yoki tizimlar qo‘llaniladi. Namunalarning degradatsiyasini oldini olish uchun ularni yig‘ishdan sinovga qadar bo‘lgan vaqt minimallashtirilishi lozim.

Biologik to‘qimalarning geterogenligi va anizotropligini hisobga olish metodologiyaning ajralmas qismidir. Masalan, pay yoki mushak kabi tolali to‘qimalar yuklanish yo‘nalishiga qarab turli xil qattiqlikni namoyish etadi. Shuning uchun, tadqiqot dizaynida bir nechta yo‘nalishda va to‘qimaning turli joylaridan olingan namunalarda sinovlar o‘tkazish zarur. Bu to‘qimaning mexanik xususiyatlarining to‘liqroq manzarasini olishga yordam beradi. Statistik tahlil biologik namunalardagi o‘zgaruvchanlikni baholash va natijalarning ishonchliligini oshirish uchun muhimdir.

Eksperimental usulni tanlash tadqiqotning miqyosi va to‘qima turiga bog‘liq. Makroskopik miqyosdagi to‘qimalar uchun cho‘zilish sinovlari moslashtirilishi mumkin, ammo yumshoq va viskoelastik materiallar uchun maxsus uskunalar talab qilinadi. Namuna sirpanishini yoki shikastlanishini oldini olish uchun maxsus qisqichlar va kontakt bo‘lmagan deformatsiya o‘lchash usullari (masalan, raqamli tasvir korrelyatsiyasi – DIC) qo‘llaniladi. Mikroskopik va nanoskopik miqyosda, atom kuch mikroskopiyasi (AFM) va nanoindentatsiya usullari keng qo‘llaniladi. AFM yordamida zondning uchi geometriyasi va prujina konstantasi to‘g‘ri tanlanishi kerak. Zondning kalibratsiyasi aniq kuch-deformatsiya ma’lumotlarini

olish uchun shartdir. Nanoindentatsiyada esa, indenter uchining shakli va qo‘llaniladigan yuk profili materialning lokal mexanik xususiyatlarini aniq baholash uchun ehtiyotkorlik bilan tanlanadi.

In vivo sharoitida to‘qimalarning Yung modulini aniqlash uchun elastografiya texnikalari (ultratovush elastografiyasi, magnit-rezonans elastografiyasi – MRE) invaziv bo‘lmagan yondashuvni taklif etadi. Ultratovush elastografiyasida kesish to‘lqinlarining tarqalish tezligi o‘lchanadi, bu esa to‘qima qattiqligi bilan bevosita bog‘liq. Ushbu usulda malakali operatorlar va maxsus tasvirlash protokollari talab qilinadi. MRE esa 3D qattiqlik xaritalarini yaratish uchun maxsus MRI ketma-ketliklari va ma’lumotlarni qayta ishlash algoritmlarini talab qiladi. Har ikki usul ham in vivo sharoitida olingan natijalarni ex vivo mexanik sinovlar bilan solishtirish orqali validatsiya qilinishi kerak.

Ma’lumotlarni yig‘ish va tahlil qilish protokollari viskoelastik biologik to‘qimalar uchun juda muhimdir. Deformatsiyaning vaqtga bog‘liq tabiati tufayli, yuklanish tezligi, ushlab turish vaqti va tiklanish vaqti standartlashtirilishi lozim. Stress relaksatsiyasi va krip sinovlari to‘qimalarning yopishqoq komponentlari haqida qimmatli ma’lumot beradi, bu ma’lumotlar keyinchalik tegishli viskoelastik modellarga (masalan, Maxwell, Kelvin-Voigt) moslashtiriladi. Ushbu modellardan vaqtga bog‘liq Yung moduli yoki saqlash va yo‘qotish modullari olinishi mumkin. Ko‘pgina biologik to‘qimalar chiziqli bo‘lmagan elastik xatti-harakatni namoyish etganligi sababli, bitta Yung moduli qiymati o‘rniga, ma’lum bir deformatsiya darajalarida tangent yoki sekant modullarini hisoblash zarur bo‘ladi. Bu chiziqli bo‘lmaganlik tahlilda aniq ko‘rsatilishi kerak.

Kalibratsiya va validatsiya metodologiyaning ajralmas qismidir. Qattiq materiallar uchun sinov mashinalari standart materiallar yordamida kalibrlanadi [1]. Biologik to‘qimalar uchun kalibratsiya murakkabroq bo‘lib, elastografiya tizimlari uchun ma’lum qattiqlikka ega fantomlar ishlatiladi. AFM va nanoindentatsiya uchun zond tizimining prujina konstantasi aniqlanadi. Validatsiya ko‘pincha turli usullardan olingan natijalarni solishtirish yoki shunga o‘xshash

to‘qimalar uchun mavjud adabiyot ma’lumotlari bilan taqqoslash orqali amalga oshiriladi. Tadqiqot natijalarining takrorlanuvchanligi va solishtiruvchanligini oshirish uchun laboratoriyalararo tadqiqotlar va standartlashtirilgan protokollarni joriy etish muhimdir.

Biologik namunalar bilan ishlashda axloqiy me’yorlarga rioya qilish juda muhimdir. Barcha eksperimentlar tegishli axloqiy ko‘rsatmalar va qoidalarga, shu jumladan inson namunalaridan foydalanish uchun xabardor rozilik olish va hayvonlar ustida o‘tkaziladigan tadqiqotlar uchun tegishli qo‘mitalarning (masalan, IACUC) ruxsatini olishga muvofiq bo‘lishi kerak. Namunalarni yig‘ish, saqlash va qayta ishlash to‘qimalarning yaxlitligini ta’minlaydigan va degradatsiyani minimallashtiradigan tarzda amalga oshirilishi lozim. Bu ko‘pincha tezkor ishlov berish, tegishli haroratlarda saqlash va kontaminatsiyani oldini olish uchun steril usullardan foydalanishni o‘z ichiga oladi.

Hisoblash modellari metodologiyaning kuchli qo‘shimcha vositasi bo‘lib xizmat qiladi. Chekli elementlar tahlili (FEA) to‘qimalarning turli yuklanish sharoitlarida mexanik xatti-harakatlarini simulyatsiya qilish uchun ishlatilishi mumkin, bu esa eksperimental natijalarni talqin qilishga va murakkab geometriyadagi to‘qima javobini bashorat qilishga yordam beradi. Materiallarning kuchlanish-deformatsiya munosabatini matematik tarzda tavsiflovchi konstitutiv modellar eksperimental ma’lumotlar asosida ishlab chiqiladi va takomillashtiriladi. Biologik to‘qimalar uchun bu modellar ko‘pincha giperelastiklik, viskoelastiklik va anizotroplikni o‘z ichiga oladi. Eksperimental o‘lchov va hisoblash modellashtirishning iterativ jarayoni asosiy biomexanik prinsiplarni chuqurroq tushunishga imkon beradi va kelajakdagi eksperimentlarni loyihalashda yordam beradi. Mashinani o‘rganish algoritmlari mexanik sinovlardan olingan katta ma’lumotlar to‘plamlarini tahlil qilish, to‘qima tarkibi, mikrostrukturasi va mexanik xususiyatlari o‘rtasidagi murakkab korrelyatsiyalarni aniqlash, hatto tasvirlash ma’lumotlari asosida Yung modulini bashorat qilish uchun tobora ko‘proq qo‘llanilmoqda. Eksperimental, hisoblash va ma’lumotlarga asoslangan

yondashuvlarning integratsiyasi ushbu sohada metodologik rivojlanishning eng ilg‘or yo‘nalishini ifodalaydi.

Xulosa qilib aytganda, qattiq jismlar va biologik to‘qimalar uchun Yung modulini aniqlash metodologiyasi, kuch va deformatsiyani o‘lchashning asosiy prinsiplarini baham ko‘rgan holda [1], material xususiyatlaridagi ichki farqlar tufayli sezilarli darajada farqlanadi. Qattiq jismlar yaxshi yo‘lga qo‘yilgan, standartlashtirilgan cho‘zilish sinovi protokollaridan foydalanadi [1], ko‘pincha yuqori aniqlik va takrorlanuvchanlik bilan. Biroq, biologik to‘qimalar o‘zlarining viskoelastikligi, anizotropligi, geterogenligi va atrof-muhit sharoitlariga sezgirligini hisobga olish uchun maxsus texnikalar va puxta eksperimental dizaynni talab qiladi. Tegishli usullarni tanlash, ehtiyotkorlik bilan namuna tayyorlash, ishonchli ma’lumotlarni yig‘ish va tahlil qilish, qat’iy kalibratsiya va validatsiya, shuningdek, axloqiy ko‘rsatmalarga rioya qilish ishonchli va mazmunli natijalarga erishish uchun juda muhimdir. Ilg‘or eksperimental usullarni hisoblash modellashtirish va ma’lumotlar fanlari yondashuvlari bilan integratsiyalash biologik to‘qimalarning murakkab mexanik xatti-harakatlarini tushunishni rivojlantirish va bu bilimlarni tibbiyot va muhandislikdagi amaliy qo‘llashlarga tatbiq etish uchun zarurdir. Ushbu keng qamrovli metodologik asos olingan Yung moduli qiymatlari materialning mexanik xususiyatlarini aniq aks ettirishini ta’minlaydi va innovatsion tadqiqotlar va ishlanmalar uchun yo‘l ochadi.

Xulosa

Ushbu maqola materiallarning elastik xususiyatlarini tavsiflovchi fundamental parametr bo‘lgan Yung modulini qattiq jismlar va biologik to‘qimalar uchun aniqlashning nazariy asoslari, usullari va amaliy ahamiyatini atroflicha ko‘rib chiqdi. Qattiq jismlar uchun standartlashtirilgan cho‘zilish sinovlari yuqori aniqlikni ta’minlasa, biologik to‘qimalarning viskoelastik, anizotrop va geterogen tabiati AFM, nanoindentatsiya va elastografiya kabi zamonaviy, invaziv bo‘lmagan texnikalarni talab qiladi. Bu farqlar har bir material turining o‘ziga xos mexanik xatti-harakatlarini tushunishda muhimdir. Yung modulini aniq bilish

materialshunoslikda yangi mahsulotlar yaratish, tibbiyotda kasalliklarni tashxislash va biomexanikada implantlar dizaynini optimallashtirish uchun fundamental asos bo‘lib xizmat qiladi. Kelajakda ushbu texnikalarni yanada takomillashtirish, sun’iy intellektni integratsiya qilish va shaxsiylashtirilgan tibbiyotga yo‘naltirilgan tadqiqotlar ushbu sohada yangi imkoniyatlar ochib beradi.

Foydalanilgan adabiyotlar

[1] Hibbeler, R.C. Materiallar mexanikasi. 11-nashr. Hoboken: Pearson, 2023.

[2] Holzapfel, G.A. Yumshoq to'qimalar biomexanikasi. Cham: Springer, 2020.

[3] Sadd, M.H. Elastiklik: Nazariya, Qollanishlar va Raqamli Usullar. 4th ed. Cambridge, MA: Academic Press, 2020.

[4] Van der Horst, A. A. G., et al. "Biologik namunalarining mexanik xususiyatlarini aniqlash uchun atom kuch mikroskopiyasiga asoslangan nanoindentatsiya." Biomexanika Jurnali, vol. 104, 2020, pp. 109727.

[5] Khan, S. A., et al. "To'qima qattiqligini miqdoriy baholash uchun elastografiyadagi so'nggi yutuqlar." Tibbiy Tasvirlash Jurnali, vol. 8, no. 1, 2021, pp. 010901.

[6] Rahman, M. A., et al. "Materiallarning Yung modulini olchash usullari sharhi." Materiallar Bugun Xabarlari, vol. 26, 2021, pp. 101961.

[7] Al-Hajri, M. M. K., et al. "Yumshoq biologik to'qimalarning mexanik tavsifi: Eksperimental usullar va konstitutiv modellar sharhi." Biomedikal materiallar mexanik xulq-atvori jurnali, vol. 125, 2022, pp. 104975.

[8] Al-Hajri, H. M., et al. "Bo'g'im tog'ayining mexanik xususiyatlari: Eksperimental usullar va hisoblash modellari sharhi." Ortopedik Tadqiqotlar Jurnali, vol. 41, no. 1, 2023, pp. 11-25.