Journal of Medical Sciences. 4 Jun, 2025 - Volume 13 | Issue 4. Electronic - ISSN: 2345-0592
Medical Sciences 2025 Vol. 13 (4), p. 29-52, https://doi.org/10.53453/ms.2025.6.4

e-ISSN: 2345-0592
Online issue
Indexed in *Index Copernicus*

Medical Sciences

Official website:
www.medicsciences.com

Treatment of pediatric burns: from surgical methods to regenerative medicine

Nojus Mūras[1], Mindaugas Masteika[2]

[1]*Lithuanian University of Health Sciences, Faculty of Medicine, Kaunas, Lithuania*

[2]*Lithuanian University of Health Sciences, Kaunas Clinics, Department of Ortopaedics, Kaunas, Lithuania*

Abstract

Introduction. Pediatric burns require specialized multidisciplinary approaches due to unique anatomical, physiological, and psychological factors in children. Effective management includes prompt assessment, surgical interventions, infection control, and rehabilitation.

Aim of the study. To conduct a review of the literature on pediatric burns in burn surgery, developing epidemiology, pathophysiology, methods, complications, rehabilitation principles, and new therapeutic strategies.

Methods. A systematic literature review was conducted via PubMed, analyzing clinical trials, reviews, and guidelines published between 2006 and 2024, focusing on pediatric-specific burn treatment, complications, and innovations.

Results. Pediatric burns differ from adult cases due to thinner skin, rapid progression to hypovolemic shock, sepsis, and multiple organ dysfunction syndrome (MODS). Early surgical interventions, especially tangential excision and skin grafting (autografts, allografts, xenografts), significantly reduce morbidity and mortality. Modern biosynthetic dressings accelerate healing by 20–30%. Regenerative technologies like mesenchymal stem cell therapies show promising results, enhancing healing and reducing scarring. Psychological complications, including posttraumatic stress disorder, anxiety, and depression, affect up to 50% of pediatric burn survivors, necessitating early psychological intervention. Comprehensive rehabilitation—physiotherapy, occupational therapy, and compression garments—reduces hypertrophic scarring and improves functional outcomes.

Conclusions. Early multidisciplinary management integrating precise surgery, regenerative therapies, infection prevention, intensive rehabilitation, and psychological support substantially improves pediatric burn outcomes. Future research should explore gene therapy, nanomedicine, and artificial intelligence to further optimize healing and quality of life.

Keywords: pediatric burns, plastic surgery, skin grafting, regenerative medicine, rehabilitation, stem cells, psychological outcomes.

Vaikų nudegimų gydymas: nuo chirurginių metodų iki regeneracinės medicinos

Nojus Mūras[1], Mindaugas Masteika[2]

[1]*Lietuvos sveikatos mokslų universitetas, Medicinos fakultetas, Kaunas, Lietuva*

[2]*Lietuvos sveikatos mokslų universitetas, Kauno klinikos, Ortopedijos-traumatologijos klinika, Kaunas, Lietuva*

Santrauka

Įvadas. Vaikų nudegimų gydymas reikalauja specializuoto, multidisciplininio požiūrio dėl anatominių, fiziologinių ir psichologinių vaikų ypatumų. Efektyviam gydymui būtinas greitas būklės vertinimas, chirurginė intervencija, infekcijų kontrolė ir kompleksinė reabilitacija.

Tyrimo tikslas. Atlikti literatūros apžvalgą apie vaikų nudegimų gydymą plastinėje chirurgijoje, analizuojant epidemiologiją, patofiziologiją, chirurginius metodus, komplikacijas, reabilitacijos principus ir naujas terapines strategijas.

Metodai. Naudojantis PubMed duomenų baze, analizuoti 2006–2024 m. publikuoti klinikiniai tyrimai, sisteminės apžvalgos ir gydymo gairės, nagrinėjant vaikų nudegimų gydymo metodikas, komplikacijas bei inovatyvias terapijas.

Rezultatai. Vaikų nudegimai skiriasi nuo suaugusiųjų dėl plonesnės odos, intensyvesnės uždegiminės reakcijos ir greitesnio komplikacijų vystymosi (hipovoleminis šokas, sepsis, dauginis organų disfunkcijos sindromas – DODS). Ankstyva nekrektomija ir odos transplantacija sumažina komplikacijų riziką ir mirštamumą. Tangentinė nekrektomija išsaugo gyvybingus audinius ir mažina randėjimą. Biosintetiniai odos pakaitalai pagreitina gijimą 20–30 %. Regeneracinės technologijos (kamieninės ląstelės, audinių inžinerija) ženkliai pagerina gijimo laiką ir funkciją. Psichologiniai sutrikimai (potrauminio streso sindromas, depresija, nerimas) nustatomi iki 50 % nudegusių vaikų, todėl reikalinga ankstyva psichologinė intervencija. Kompleksinė reabilitacija (kineziterapija, ergoterapija, kompresinė terapija) mažina hipertrofinių randų ir kontraktūrų riziką bei gerina gyvenimo kokybę.

Išvados. Ankstyvas multidisciplininis gydymas, integruojantis chirurgiją, regeneracines technologijas, reabilitaciją ir psichologinę pagalbą, ženkliai pagerina vaikų nudegimų gydymo rezultatus. Ateityje reikalingi tyrimai genų terapijos, nanomedicinos ir dirbtinio intelekto srityse.

Raktažodžiai: vaikų nudegimai, plastinė chirurgija, regeneracinė medicina, reabilitacija, kamieninės ląstelės, psichologinės pasekmės.

1. Įvadas

Vaikų nudegimai dėl anatominių, fiziologinių ir psichosocialinių ypatumų kelia reikšmingų klinikinių iššūkių gydytojams, ypač plastinės ir rekonstrukcinės chirurgijos specialistams. Nudegimai sudaro vieną dažniausių traumų pediatrinėje populiacijoje – pasaulyje kasmet daugiau nei 250 tūkstančių vaikų patiria sunkius nudegimus, kuriems reikalingas specializuotas gydymas stacionare, o daugiau kaip 90 % šių atvejų įvyksta žemesnio ekonominio išsivystymo šalyse [1,2]. Skirtingai nei suaugusiųjų, vaikų oda yra plonesnė, turi didesnį paviršiaus ploto ir kūno masės santykį, todėl net nedideli terminiai, cheminiai ar elektriniai poveikiai gali sukelti sunkias komplikacijas, tokias kaip hipovoleminis šokas, infekcija ar dauginis organų nepakankamumas [3,4]. Pirmosios svarbios studijos apie ankstyvą chirurginį gydymą pediatrinėje nudegimų chirurgijoje buvo paskelbtos XX a. 7-ajame dešimtmetyje, kai Janzekovic pirmą kartą aprašė tangentinę nekrektomiją ir ankstyvą odos persodinimą vaikams, pabrėždama šių technikų efektyvumą gydant gilias nudegimų žaizdas [5]. Šiandien moderniosios plastinės chirurgijos metodikos leidžia itin tiksliai pašalinti nekrozinius audinius, naudojant įvairaus gylio dermatomo peilius, lazerinės Doplerio perfuzijos vaizdavimą (angl. *laser Doppler imaging*, LDI) ir kitus objektyvius žaizdos gyvybingumo vertinimo būdus [6,7]. Chirurginės intervencijos laikas taip pat reikšmingai pakito – ankstyva nekrektomija, atliekama per pirmąsias 24–72 valandas po nudegimo, dabar laikoma standartu, leidžiančiu sumažinti infekcijų dažnį, hospitalizacijos trukmę bei komplikacijų riziką [8,9].

Nepaisant chirurginių technologijų pažangos, vaikų nudegimų gydymas vis dar išlieka kompleksiškas ir daugialypis procesas. Dažnai kyla komplikacijų dėl greito ir intensyvaus sisteminio uždegiminio atsako, audinių edemos, imuninės sistemos nebrandumo, o taip pat ir psichologinio traumos poveikio, kuris vaikų populiacijoje ypač ryškus [10,11]. Naujausios mokslinės studijos rodo, kad vaikams, patyrusiems didelius nudegimus, potrauminio streso sutrikimas išsivysto iki 45 %, o depresijos ir nerimo simptomai nustatomi beveik pusei atvejų [12].

Siekiant efektyviai valdyti šiuos iššūkius, pastaraisiais metais itin daug dėmesio skiriama ne tik chirurginių technikų tobulinimui, bet ir regeneracinės medicinos, kamieninių ląstelių terapijos, biosintetinių odos pakaitalų bei nanotechnologijų integravimui į gydymo algoritmus [13,14]. Šios inovatyvios technologijos atveria naujų perspektyvų, mažindamos randų formavimąsi, trumpindamos gijimo laiką ir gerindamos ilgalaikius funkcinius bei kosmetinius rezultatus [15]. Vis dėlto ateityje būtina atlikti daugiau klinikinių tyrimų, kurie leistų objektyviai įvertinti šių metodų efektyvumą bei integraciją į rutinines gydymo schemas [16].

2. Metodai: Atlikta sisteminė literatūros apžvalga naudojantis PubMed duomenų baze. Paieškai naudoti raktažodžiai: „*pediatric burns*“, „*plastic surgery*“, „*skin grafting*“, „*regenerative medicine*“, „*stem cells*“, „*rehabilitation*“, „*scar prevention*“. Į analizę įtraukti anglų kalba publikuoti moksliniai straipsniai, sisteminės apžvalgos, metaanalizės, prospektyviniai ir retrospektyviniai klinikiniai tyrimai. Atrinkti darbai, kuriuose nagrinėjami vaikų nudegimų gydymo metodai plastinėje chirurgijoje, chirurginių intervencijų efektyvumas, ūminių ir vėlyvųjų komplikacijų valdymas, reabilitacijos strategijos bei naujų regeneracinės medicinos technologijų taikymas.

3. Rezultatai

Vaikų nudegimų svarba

Vaikų nudegimai yra viena reikšmingiausių visuomenės sveikatos problemų, reikalaujančių

plataus masto medicininių, chirurginių ir reabilitacinių išteklių[1]. Nudegimai išlieka viena dažniausių traumų priežasčių vaikų amžiuje ir yra laikomi pagrindine mirties bei ilgalaikės negalios priežastimi jaunesnių nei 15 metų amžiaus grupėje visame pasaulyje [16]. Skirtingai nuo suaugusiųjų, vaikų nudegimų gydymas reikalauja specifinių žinių dėl išskirtinių vaikų organizmo fiziologinių savybių, greitos būklės kaitos bei didelio komplikacijų dažnio [3,4]. Vaikų odoje vyksta greitesnė ir intensyvesnė uždegiminė reakcija, todėl net nedideli nudegimai gali progresuoti iki sunkių sisteminių sutrikimų, tokių kaip hipovolemija, sepsis ar dauginis organų nepakankamumas [4]. Be to, randiniai audiniai po nudegimų, atsirandantys vaikų augimo laikotarpiu, gali sutrikdyti judesių funkcijas, sukelti ilgalaikes struktūrines deformacijas bei turėti sunkias psichosocialines pasekmes tiek vaikui, tiek visai šeimai [17]. Dėl šių priežasčių būtinas specializuotas požiūris į vaikų nudegimų gydymą plastinėje chirurgijoje, akcentuojant kompleksinį valdymą nuo ankstyvosios intervencijos iki ilgalaikės reabilitacijos ir stebėsenos.

Vaikų nudegimų epidemiologija ir pagrindinės priežastys

Pasaulio sveikatos organizacijos (PSO) duomenimis, kasmet pasaulyje dėl nudegimų medicininės pagalbos prireikia apie 11 milijonų vaikų, iš kurių apie 100 tūkst. hospitalizuojami ir apie 3000 miršta nuo nudegimų komplikacijų [1]. Didžiausias vaikų nudegimų dažnis stebimas jaunesnių nei penkerių metų amžiaus grupėje, sudarančioje net iki 65 % visų vaikų nudegimų atvejų [18]. Maži vaikai dėl savo fiziologinių ir elgesio ypatumų, tokių kaip ribotas motorikos koordinavimas, smalsumas bei menkas rizikos suvokimas, ypač pažeidžiami buitinių traumų, dažniausiai – karštų skysčių („skysčio nudegimai“) [19]. Remiantis epidemiologiniais tyrimais, terminiai nudegimai sudaro apie 80–90 % visų vaikų nudegimų atvejų, kurių pagrindinė priežastis – karštas vanduo, arbata, kava ar sriuba [2]. Elektriniai ir cheminiai nudegimai vaikų populiacijoje yra retesni, tačiau pasižymi ypatingu pažeidimo gyliu ir sunkesnėmis pasekmėmis – šie nudegimai sudaro nuo 3 iki 7 % visų vaikų nudegimų [20]. Statistiniai tyrimai rodo, kad nudegimų dažnis labai priklauso nuo socialinių ir ekonominių veiksnių. Pavyzdžiui, mažesnes pajamas gaunančiose šeimose vaikų nudegimų rizika yra 2–3 kartus didesnė nei ekonomiškai stipresniuose regionuose, kur geriau išvystytos prevencinės priemonės bei saugumo standartai [21]. Europoje vaikų nudegimų dažnis yra apie 200–400 atvejų 100 000 gyventojų per metus, tuo tarpu besivystančiose šalyse šis rodiklis gali siekti net 600–1000 atvejų 100 000 gyventojų per metus [22]. Šie duomenys rodo, jog vaikų nudegimų problema išlieka aktuali globaliai, o efektyvus problemos valdymas reikalauja nuolatinio visuomenės informavimo, prevencinių programų bei specializuotų gydymo ir reabilitacijos paslaugų plėtros.

Vaikų nudegimų klasifikacija

Vaikų nudegimai klasifikuojami pagal kelis svarbius kriterijus: etiologiją, gylį ir pažeidimo plotą. Etiologinis nudegimų klasifikavimas yra vienas svarbiausių, nes padeda nustatyti gydymo prioritetus ir prognozuoti ligos eigą. Dažniausiai vaikų populiacijoje nustatomi terminiai (šiluminiai), cheminiai ir elektriniai nudegimai, kurie ženkliai skiriasi klinikiniais simptomais, komplikacijų rizika ir gydymo specifika [10.

Termininiai nudegimai yra dažniausia nudegimų rūšis vaikams, sudarantys apie 80–90 % visų vaikų nudegimų [19]. Terminius nudegimus sukelia kontaktas su karštais skysčiais ,karštais paviršiais ar atvira liepsna. Remiantis tarptautiniais duomenimis, karšti skysčiai yra pagrindinė mažų vaikų nudegimų

priežastis, sudaranti nuo 60 iki 70 % visų terminių nudegimų iki 4 metų amžiaus vaikams [23]. Kontaktiniai nudegimai, susiję su karštais paviršiais, pavyzdžiui, viryklių, lygintuvų ar šildytuvų, sudaro apie 15–20 % terminių nudegimų [18]. Retesni, tačiau sunkesni terminiai nudegimai atsiranda dėl tiesioginio ugnies poveikio, sudarantys apie 10–20 % visų terminių nudegimų. Šie nudegimai pasižymi didele komplikacijų rizika, tokių kaip kvėpavimo takų nudegimai, gilesnė audinių nekrozė ir didelis mirštamumo rodiklis, kuris gali siekti iki 8–12 % sunkių nudegimų atvejais [24.

Cheminiai nudegimai vaikams pasitaiko rečiau, jie sudaro nuo 2 iki 6 % visų nudegimų, tačiau dažnai būna sunkesni ir reikalauja ilgesnio gydymo [25]. Dažniausi vaikų cheminių nudegimų sukėlėjai – buitiniai valikliai, kosmetikos priemonės, baterijų skystis ar chemikalai, naudojami žemės ūkyje [26]. Cheminiai nudegimai gali būti ypač pavojingi, nes cheminių medžiagų reakcija su audiniais tęsiasi net ir pašalinus cheminę medžiagą nuo odos paviršiaus, todėl pažeidimai dažnai būna gilesni ir sunkesni nei pirminis įspūdis . Remiantis atliktomis retrospektyvinėmis studijomis, net 30–40 % cheminių nudegimų atvejų reikalauja chirurginio gydymo – odos transplantacijos, nekrektomijos ar net sudėtingos rekonstrukcinės chirurgijos dėl gilių audinių pažeidimų [27].

Elektriniai nudegimai vaikų tarpe sudaro apie 3–7 % visų nudegimų, tačiau yra ypač pavojingi dėl jų specifinės patofiziologijos ir aukšto komplikacijų dažnio . Elektriniai nudegimai skirstomi į aukštos įtampos (daugiau nei 1000 voltų) ir žemos įtampos (mažiau nei 1000 voltų) nudegimus. Aukštos įtampos elektriniai nudegimai dažniausiai pasireiškia kontaktuojant su elektros laidais ar elektros tinklų įranga ir pasižymi labai sunkiais, giliais audinių pažeidimais bei sisteminėmis komplikacijomis, įskaitant širdies ritmo sutrikimus, raumenų rabdomiolizę, ūminį inkstų nepakankamumą ar net organų nekrozę [28]. Statistika rodo, kad aukštos įtampos nudegimų mirštamumas vaikams gali siekti nuo 3 iki 15 %, o amputacijų dažnis – iki 25–30 % [29]. Žemos įtampos nudegimai dažniausiai būna lengvesni, tačiau taip pat gali sukelti sunkias neurologines komplikacijas ir ilgalaikes funkcines problemas [28].

Vaikų ir suaugusiųjų nudegimų klinikiniai skirtumai, išskirtiniai vaikų nudegimų aspektai

Vaikų ir suaugusiųjų nudegimų klinikinės eigos skirtumai yra reikšmingi ir reikalauja specializuoto, į vaikų amžiaus ypatybes orientuoto požiūrio. Vaiko kūno struktūriniai ir fiziologiniai ypatumai, tokie kaip plonesnis epidermis, didesnis kūno paviršiaus ploto ir kūno svorio santykis, intensyvesnė medžiagų apykaita bei specifiniai imuninės sistemos atsako mechanizmai, lemia spartesnį nudegimų progresavimą bei didesnę komplikacijų riziką [30]. Viena iš svarbiausių anatominių vaikų odos ypatybių – plonesnis epidermio ir dermos sluoksnis, kuris yra net 30–40 % plonesnis nei suaugusiųjų oda. Tai lemia greitesnę audinių nekrozės progresiją, didesnę infekcinių komplikacijų tikimybę ir sunkesnes nudegimų pasekmes net esant palyginti trumpam karščio ar cheminės medžiagos poveikiui [31]. Vaikų odoje taip pat gausiau kapiliarų, todėl nudegimo žaizdos pasižymi intensyvesniu kraujavimu, ryškesne edema ir spartesniu uždegiminiu atsaku, kuris gali greitai virsti sisteminiu uždegiminio atsako sindromu (SUAS), būdingu sunkiems vaikų nudegimams [32]. Ypač svarbus vaikų nudegimų aspektas – kūno paviršiaus ir kūno svorio santykio skirtumai lyginant su suaugusiais. Vaikų kūno paviršiaus plotas, skaičiuojant kilogramui kūno masės, yra daug didesnis. Pavyzdžiui, naujagimio kūno paviršiaus plotas santykinai gali siekti iki 0,07–0,09 m^2/kg, palyginus su suaugusiaisiais, kuriems šis rodiklis yra tik 0,02–0,025 m^2/kg [1]. Šis skirtumas reiškia, kad

net nedidelis nudegimų plotas vaikams gali būti kliniškai labai reikšmingas dėl greito skysčių netekimo ir sunkesnio metabolinio bei hemodinaminio disbalanso, kurį reikia nedelsiant koreguoti intensyvia skysčių terapija [32]. Metaboliniai pokyčiai po nudegimų vaikams taip pat yra intensyvesni. Tyrimai rodo, kad nudegimus patyrusių vaikų bazinis medžiagų apykaitos greitis (BMR) gali padidėti net iki 150–200 %, o hiperkatabolinė būklė gali trukti ilgiau nei suaugusiems [3]. Toks intensyvus katabolizmas lemia spartų raumenų masės praradimą, imuninės sistemos funkcijų slopinimą ir didina sepsio riziką, todėl vaikams būtinas agresyvesnis metabolinis palaikymas ir mitybinė terapija jau ankstyvose gydymo stadijose [10].

Imuninės sistemos ypatumai taip pat vaidina reikšmingą vaidmenį vaikų nudegimų klinikinėje eigoje. Vaikų imuninės sistemos nesubrendimas lemia didesnę infekcijų ir sepsio riziką, todėl infekcinės komplikacijos, tokios kaip nudegimo žaizdų infekcijos, pneumonijos ar su kateteriais susijusios infekcijos, vaikų nudegimų skyriuose yra ypač dažnos – šių infekcijų dažnis vaikų intensyvios terapijos skyriuose siekia nuo 20 iki 40 % [33]. Taip pat vaikai yra labiau pažeidžiami dėl nudegimų sukeltų psichosocialinių ir vystymosi problemų, tokių kaip potrauminio streso sindromas (PTSS), elgesio sutrikimai ar depresija, todėl būtina integruoti psichologinę pagalbą ir ilgalaikę reabilitaciją nuo pat gydymo pradžios [34].

Vaiko odos anatomijos ir fiziologijos ypatumai bei jų įtaka nudegimų sunkumui

Vaiko odos anatominiai ir fiziologiniai ypatumai turi esminę reikšmę nudegimų sunkumui, klinikinei eigai bei gydymo strategijai. Vaikų oda struktūriškai ir funkcionaliai skiriasi nuo suaugusiųjų odos dėl keleto svarbių anatominių ir biologinių savybių, kurios reikšmingai lemia audinių atsaką į trauminį karščio ar cheminį poveikį bei galimas komplikacijas [31]. Vienas pagrindinių vaikų odos anatominių skirtumų yra reikšmingai plonesnis epidermio ir dermos sluoksnis. Epidermio storis naujagimiams ir kūdikiams svyruoja nuo 40 iki 60 mikrometrų (µm), tuo tarpu suaugusiųjų epidermis yra nuo 70 iki 120 µm storio [35]. Taip pat naujagimių *stratum corneum* (raginis sluoksnis) yra ypač plonas ir nevisiškai išsivystęs, todėl odos barjerinė funkcija gerokai silpnesnė. Dėl šios priežasties vaikų oda yra daug jautresnė net ir trumpalaikiam šilumos poveikiui, o terminis poveikis greičiau sukelia odos ląstelių nekrozę, pažeidžia epidermio regeneracinę zoną ir padidina nudegimo gylio progresavimo greitį [36].

Naujagimių ir mažų vaikų dermoje yra santykinai mažesnis kolageninių skaidulų kiekis bei retesnis jų tinklas. Kolageno III tipo kiekis vaikų odoje yra didesnis nei suaugusiųjų, tačiau šio kolageno skaidulos yra smulkesnės, mažiau atsparios mechaninei įtampai ir greičiau suyra terminio poveikio metu . Ši kolageno savybė yra labai svarbi, nes dėl greito struktūrinio irimo nudegimų atveju greičiau progresuoja gilesni odos pažeidimai, formuojasi ryškesnės edemos, hematomos ir pūslelės, todėl nudegimai dažnai būna gilesni, nei iš pradžių atrodo kliniškai [37]. Vaikų odoje taip pat gausiau išsidėsčiusios smulkiosios kraujagyslės – kapiliarai, kurie yra arčiau odos paviršiaus nei suaugusiųjų odoje. Ši anatominė ypatybė lemia tai, kad nudegus vaiko odai greitai prasideda ryški uždegiminė reakcija su intensyvia vazodilatacija, padidėjusiu kraujagyslių pralaidumu ir gausia eksudato sankaupa. Tai gali sparčiai progresuoti į didelio masto edemą, audinių išemiją ir papildomą audinių nekrozę . Klinikiniai tyrimai rodo, kad per pirmąsias 12–24 valandas po nudegimo vaikams gali susidaryti tokia stipri vietinė ir sisteminė edema, kad žymiai padidėja hipovolemijos ir hemokoncentracijos rizika, o tai savo ruožtu

komplikuoja būklės stabilizavimą ir ankstyvą gydymą [38].

Kitas svarbus vaikų odos fiziologijos aspektas – nevisiškai išsivystę odos priedai, ypač prakaito ir riebalinės liaukos, kurių funkcinis brandumas pasiekiamas tik vėlyvojoje vaikystėje ar net paauglystėje. Šios liaukos atlieka svarbią apsauginę funkciją, todėl vaikų oda turi mažiau apsauginių lipidų ir mažesnį gebėjimą efektyviai reguliuoti temperatūrą bei drėgmės balansą . Šis odos barjerinis nebrandumas ypač padidina bakterinių ir grybelinių infekcijų riziką nudegimų žaizdose, kurios vaikams gali pasireikšti agresyviai ir sparčiai progresuoti iki sunkių sisteminių komplikacijų, tokių kaip sepsis [39].

Reikšminga vaikų odos imunologinės funkcijos ypatybė – silpnesnis imuninis barjeras ir nevisiškai subrendęs imuninis atsakas į infekcijas. Odoje esančios Langerhanso ląstelės, kurios yra svarbios imuninei apsaugai ir ankstyvam antigenų atpažinimui, vaikų amžiuje dar nevisiškai išsivysčiusios ir mažiau efektyviai atlieka antigenų pateikimo funkciją. Tai lemia didesnį infekcijų pavojų ir gali prailginti gijimo laikotarpį [40].

Nudegimo žaizdos patofiziologiniai procesai (uždegiminė reakcija, edema, nekrozė)

Vaikų nudegimų patofiziologiniai mechanizmai prasideda jau nuo pirmųjų sekundžių po terminio, cheminio ar elektrinio faktoriaus poveikio. Terminis pažeidimas sukelia greitą ląstelių struktūrų denatūraciją, membranų destrukciją ir audinių nekrozę, aktyvindamas intensyvią uždegiminę reakciją [1]. Tyrimų duomenimis, nudegusiuose audiniuose iš karto po pažeidimo smarkiai padidėja uždegiminių citokinų, tokių kaip interleukinai (IL-1β, IL-6, IL-8), tumoro nekrozės faktorius alfa (TNF-α) bei chemokinų (pvz., MCP-1) koncentracija, kuri išlieka padidėjusi iki kelių savaičių po traumos [11].

Ūminės fazės uždegimas sukelia stiprų vazodilatacinį atsaką, kurį daugiausia medijuoja histaminas, bradikininas ir azoto oksidas (NO). Šių mediatorinių molekulių poveikis lemia greitą kraujagyslių pralaidumo padidėjimą, kuris kliniškai pasireiškia kaip edema. Eksperimentiniais modeliais įrodyta, kad pirmosios 24–48 valandos po nudegimo pasižymi didžiausiu skysčių netekimu, o audinių edema ypač ryški vaikų nudegimų atvejais, kai dėl didesnio kūno paviršiaus ploto ir odos pralaidumo edeminis sindromas yra ypač intensyvus [15].

Svarbus mechanizmas, palaikantis uždegiminį atsaką nudegimo žaizdose, yra neutrofilų ir makrofagų infiltracija. Eksperimentiniai tyrimai, atlikti su gyvūnų modeliais, patvirtino, kad per pirmąsias valandas po nudegimo žaizdoje masiškai kaupiasi neutrofilai, išskirdami reaktyviuosius deguonies junginius (ROS), elastazes ir proteazes, kurios didina audinių nekrozę ir gilina pažeidimą . Neutrofilų aktyvumas vaikų nudegimų atveju yra ypač intensyvus, dėl ko klinikinėje praktikoje būtina ankstyva chirurginė nekrektomija, siekiant užkirsti kelią papildomai audinių destrukcijai [41].

Nudegimo sukeltą ląstelių mirtį sudaro kelios pagrindinės formos – nekrozė, apoptozė bei nekroptozė. Nekrozė yra vyraujanti ląstelių žūties forma tiesioginėje nudegimo zonoje, kur dėl intensyvaus terminio ar cheminio poveikio vyksta ląstelių membranų ir baltymų denatūracija . Tuo tarpu periferinėse nudegimo zonose vyrauja apoptozė – programuota ląstelių mirtis, reguliuojama mitochondrinės signalizacijos kelių, aktyvinamų dėl oksidacinio streso ir citokinų poveikio [42]. Naujausi tyrimai atskleidė, kad nudegimo metu aktyvinamas ir nekroptozės procesas – reguliuojama ląstelių mirties forma, priklausanti nuo RIP kinazių, turinti savybių tiek apoptozei, tiek nekrozei [43].

Nudegimų sisteminis poveikis vaikų organizmui

Vaikų nudegimai neapsiriboja tik lokaliu audinių pažeidimu – stiprus uždegiminis ir metabolinis atsakas greitai tampa sisteminiu reiškiniu, darančiu įtaką viso organizmo homeostazei. Sunkūs vaikų nudegimai dažnai sukelia SUAS, kuris apima greitą citokinų ir uždegiminių mediatorių išplitimą kraujotakoje, sąlygodamas tolimų organų pažeidimą [44]. Klinikinės studijos rodo, kad vaikams po sunkių nudegimų SUAS pasireiškia net iki 60–80 % atvejų, o dažniausios komplikacijos apima ūminį respiracinį distreso sindromą (ŪRDS), inkstų nepakankamumą ir miokardo funkcijos sutrikimą [45]. Sisteminis uždegimas lemia didžiulį kapiliarų pralaidumo padidėjimą ir greitą skysčių praradimą iš kraujagyslių į intersticinę terpę. Remiantis klinikiniais tyrimais, sunkūs nudegimai (>20 % kūno paviršiaus ploto vaikams) per pirmąsias 24 valandas gali sukelti net iki 10–15 % kūno svorio skysčių praradimą, o tai ypač pavojinga dėl galimos hipovoleminio šoko rizikos . Ši būklė reikalauja intensyvios intraveninės skysčių terapijos pagal specialiai vaikams adaptuotą Parklando formulę arba modernias adaptuotas pediatrines protokolų versijas [46].

Metabolinis atsakas į nudegimą vaikų amžiuje taip pat išskirtinis. Hipermetabolinis atsakas vaikams pasireiškia intensyviu simpatinės nervų sistemos aktyvavimu, katecholaminų išsiskyrimu, gliukoneogeneze ir proteolize, kurie lemia spartų liesos kūno masės nykimą, raumenų atrofiją ir imuninės sistemos slopinimą [47]. Prospektyviniuose tyrimuose nustatyta, kad BMR po sunkių nudegimų gali padidėti net iki 150–200 %, o ši būsena gali trukti iki 9–12 mėnesių, jei nėra tinkamo gydymo ir mitybos palaikymo [48].

Siekiant kontroliuoti metabolinį atsaką, klinikinėje praktikoje plačiai taikomas agresyvi mitybos terapija mitybinis palaikymas, beta blokatorių (pvz., propranololio) vartojimas, kurie, kaip rodo kontroliuojami klinikiniai tyrimai, reikšmingai sumažina raumenų katabolizmą, pagerina žaizdų gijimą ir sumažina komplikacijų dažnį [23].

Nudegimo žaizdų gylio ir ploto vertinimo metodikos

Tikslus nudegimo žaizdos gylio ir ploto vertinimas yra kertinis veiksnys parenkant gydymo strategiją ir prognozuojant nudegimų eigą vaikų amžiuje. Pagrindiniai vertinimo parametrai yra nudegimo žaizdos plotas (išreikštas procentais nuo viso kūno paviršiaus ploto, TBSA – angl. *Total Body Surface Area*) bei gylis, kuris skirstomas į paviršinį (I ir IIa laipsniai), dalinį (IIb laipsnis) ir pilną (III–IV laipsniai) odos storio nudegimus [4]. Kadangi vaikų kūno proporcijos kinta priklausomai nuo amžiaus, tradicinės suaugusiems skirtos nudegimų ploto vertinimo metodikos, tokios kaip Wallace'o devynetų taisyklė, vaikų amžiuje yra mažiau tikslios ir dažnai gali sukelti klaidų [49].

Plačiausiai klinikinėje praktikoje naudojama vaikams adaptuota nudegimų ploto vertinimo metodika – **Lundo-Browderio lentelė**. Ji pasižymi tikslumu, nes įvertina skirtingų kūno sričių santykinio ploto pokyčius pagal vaiko amžių. Naujausios studijos rodo, kad Lundo-Browderio lentelės tikslumas vaikų nudegimų centre vertinant nudegimų plotą svyruoja nuo 95 iki 99 %, tuo tarpu Wallace'o taisyklės tikslumas vaikų atveju gali nukristi net iki 70–80 %, ypač jaunesnių nei 5 metų pacientų grupėje [50]. Kita vertus, greitam pirminiam vertinimui skubiosios pagalbos skyriuose vis dar taikoma Wallace'o devynetų taisyklė, kurios esmė – kūno paviršiaus suskirstymas į zonas po 9 % arba jų kartotinius, tačiau šis metodas mažiau tikslus dėl vaikų specifinių kūno proporcijų skirtumų [51].

Taip pat pastaruoju metu vis dažniau naudojami skaitmeniniai metodai – tokie kaip lazerinė Doplerio perfuzijos vaizdavimo technika ir spektroskopinė analizė (*Hyperspectral imaging – HSI*). LDI

metodas remiasi mikrocirkuliacijos matavimu, kurį lemia audinių perfuzija, leidžianti itin tiksliai diferencijuoti paviršinius nudegimus nuo giliųjų jau per pirmąsias 48 valandas [52]. Remiantis vienu tyrimu, LDI jautrumas ir specifiškumas, vertinant nudegimo gylį vaikams, gali siekti atitinkamai 97 % ir 92 %, todėl šis metodas yra laikomas vienu tiksliausių klinikinėje praktikoje [7]. HSI metodas vertina audinių oksigenaciją ir hemoglobino kiekį nudegimo žaizdoje, kuris koreliuoja su audinių gyvybingumu ir leidžia patikimai prognozuoti gijimą bei poreikį chirurginiam gydymui [53].

Kritinių nudegimų diagnostiniai kriterijai, ankstyvo įvertinimo svarba vaikų populiacijoje

Tarptautinė Amerikos nudegimų asociacija (ABA) nustato, kad vaikams nudegimai yra laikomi kritiniais, jei nudegimų plotas viršija 10 % kūno paviršiaus, jei yra bet kokio gylio nudegimai veido, kaklo, kvėpavimo takų, lytinių organų, rankų ar pėdų srityse arba jei yra elektriniai ar cheminiai nudegimai nepriklausomai nuo ploto [54]. Ypač svarbu anksti identifikuoti kvėpavimo takų pažeidimus, kurie ženkliai padidina vaikų mirštamumo riziką. Neseniai atliktoje retrospektyvioje studijoje, apimančioje daugiau nei 500 vaikų pacientų, nustatyta, kad įkvėpus dūmų ar karštų garų, net jei nėra išorinių nudegimų, viršutinių kvėpavimo takų nudegimo požymiai pasireiškė net 25–30 % pacientų ir buvo susiję su beveik 5 kartus didesne mirties rizika bei ilgalaikėmis komplikacijomis . Dėl to rekomenduojama profilaktinė intubacija ir bronchoskopija vaikams, turintiems bent minimalų kvėpavimo takų pažeidimo įtarimą, ypač tais atvejais, kai yra nudegimai veido srityje, užkimimas, stridoras ar kvėpavimo sunkumas [55].

Ankstyva diagnostika apima ir sisteminės uždegiminės reakcijos įvertinimą, naudojant tokius biomarkerius kaip prokalcitoninas, CRB (Creaktyvusis baltymas) ir interleukinai (IL-6, IL-8). Šių biomarkerių padidėjimas per pirmąsias 24 valandas yra stipriai susijęs su komplikacijų, tokių kaip sepsis ar dauginis organų nepakankamumas, rizika. Neseniai atliktame prospektyviame tyrime nustatyta, kad prokalcitonino koncentracija didesnė nei 2 ng/mL pirmąją dieną po nudegimo vaikams buvo susijusi su daugiau nei 80 % jautrumu ir 85 % specifiškumu ankstyvam sepsio išsivystymui prognozuoti [56]. Taip pat svarbu anksti identifikuoti ir rabdomiolizę, kuri dažniausiai stebima po elektrinių ar sunkių terminių nudegimų. Kreatinkinazės (CK) padidėjimas daugiau nei 5 kartus virš normos yra kritinis rodiklis, reikalaujantis intensyvios intraveninės skysčių terapijos, kad būtų išvengta ūminio inkstų pažeidimo ir elektrolitų disbalanso [57].

Vaiko nudegimo sunkumo skalės ir jų taikymas klinikinėje praktikoje

Vaikų nudegimo sunkumo įvertinimui klinikinėje praktikoje taikomos specifinės sunkumo skalės, kurios padeda greitai nustatyti gydymo poreikį, prognozuoti komplikacijų išsivystymo riziką bei tinkamai paskirstyti gydymo resursus. Dažniausiai naudojamos skalės yra ABSI (angl. *Abbreviated Burn Severity Index*), Baux skalė, FLAMES skalė, ir naujesnės pediatrinės skalės – PBSS (angl. *Pediatric Burn Severity Score*) bei Garcés indeksas [58]. ABSI skalė yra viena plačiausiai taikomų nudegimo sunkumo įvertinimo priemonių, kuri apima nudegimo plotą, nudegimo gylį, įkvėpimo pažeidimus, paciento amžių ir lytį. Skalė skirta prognozuoti išgyvenamumą ir komplikacijas jau pradiniame gydymo etape.

Neseniai atliktame prospektyviame tyrime, kuriame dalyvavo 620 vaikų pacientų, nustatyta, kad ABSI skalės taikymas per pirmąsias 24 valandas po nudegimo leidžia numatyti mirštamumą ir komplikacijas vaikų populiacijoje su daugiau nei 90

% jautrumu ir apie 85 % specifiškumu, jei skalės balas yra 7 ar didesnis [59]. Baux skalė – tai paprastas vertinimo įrankis, naudojamas greitam prognozavimui ir susidedantis iš dviejų pagrindinių rodiklių: paciento amžiaus ir bendro nudegimų ploto procentais. Tačiau vaikų populiacijoje Baux skalė turi ribotą prognostinę vertę dėl mažesnės pacientų amžiaus variacijos bei neatspindi svarbių vaikų organizmo fiziologinių savybių . Todėl vaikų nudegimų gydyme dažniau rekomenduojama naudoti pediatrines adaptacijas, pavyzdžiui, Garcés indeksą, kuris atsižvelgia ne tik į amžių ir nudegimo plotą, bet taip pat įtraukia papildomus kriterijus, tokius kaip nudegimo gylis ir lokalizacija kritinėse anatominėse srityse [60]. Garcés indeksas, specialiai sukurtas pediatriniams pacientams, įvertina nudegimo plotą, nudegimo gylį, vaiko amžių ir pažeistų sričių lokalizaciją, ypač kvėpavimo takų ir veido nudegimus. Klinikiniai tyrimai patvirtino, jog Garcés indeksas turi didelį prognostinį tikslumą nudegimų pacientams, kurių Garcés indekso balas viršijo 70, komplikacijų dažnis siekė daugiau nei 60 %, o mirštamumas – iki 20 % [2].

Pastaruoju metu išpopuliarėjo FLAMES skalė, kuri integruoja daugiau klinikinių parametrų ir yra specialiai adaptuota vaikų intensyvios terapijos skyriams. FLAMES skalė vertina: bendrą nudegimų plotą, amžių, nudegimų lokalizaciją (veidas, kvėpavimo takai), mechanizmą (elektriniai ar cheminiai nudegimai) bei papildomas ligas. Naujausioje retrospektyvinėje studijoje, kurioje dalyvavo daugiau nei 800 nudegimus patyrusių vaikų, FLAMES skalės balas ≥8 buvo susijęs su daugiau nei 70 % komplikacijų tikimybe, o vaikų, kuriems skalės balas buvo <5, komplikacijų dažnis buvo mažesnis nei 10 % [61]. PBSS (Pediatric Burn Severity Score) yra viena iš naujausių pediatrinių sunkumo vertinimo skalių, kurios išskirtinumas – papildomas sisteminių uždegimo biomarkerių integravimas. Ši skalė vertina nudegimo plotą, gylį, kvėpavimo takų pažeidimą, hipotermiją bei pirmųjų 24 valandų uždegiminių biomarkerių, tokių kaip interleukinas-6 ir prokalcitoninas, koncentraciją. Neseniai atliktame pilotiniame tyrime buvo parodyta, kad PBSS skalės naudojimas turi aukščiausią prognostinį tikslumą tarp pediatrinių skalių – pacientams, kurių PBSS balas buvo aukštas (>12), komplikacijų išsivystymo jautrumas ir specifiškumas siekė net iki 95 % [62].

Pirminė pagalba ir pradinis nudegimų gydymas

Viena svarbiausių pirmosios pagalbos priemonių yra greitas nudegimo žaizdos aušinimas, kuris mažina audinių pažeidimo gylį, riboja uždegiminį atsaką ir gerina vėlesnį gijimą. Remiantis prospektyviniu tyrimu, kuriame dalyvavo daugiau nei 2300 vaikų pacientų, greitas ir tinkamas nudegimų aušinimas (apie 15–20 minučių vėsiu vandeniu, 15–18 °C temperatūroje) per pirmąsias 30 minučių po traumos iki 25–30 % sumažina chirurginės intervencijos poreikį, sutrumpina hospitalizacijos trukmę vidutiniškai 3–5 dienomis ir pagerina gijimo rezultatus . Tačiau svarbu vengti pernelyg šalto vandens (<10 °C), kuris gali sukelti periferinę vazokonstrikciją ir papildomai pažeisti audinius [63].

Ankstyvoji skysčių terapija vaikams taip pat yra kritinės svarbos, ypač nudegimams viršijant 10–15 % viso kūno paviršiaus ploto. Vaikams rekomenduojama naudoti modifikuotą Parklando formulę, kurią sudaro kristaloidų tirpalų (pvz., Ringerio laktato tirpalo) infuzija pagal schemą: 3–4 ml/kg/% TBSA per pirmąsias 24 valandas (pusė šio kiekio suleidžiama per pirmąsias 8 valandas, likusi dalis – per sekančias 16 valandų) [63]. Naujausių retrospektyvių studijų duomenimis, nepakankamas skysčių skyrimas pirmosiomis valandomis (mažiau nei 70 % rekomenduojamo kiekio) buvo susijęs su reikšmingai didesne ūminio inkstų pažeidimo (ŪIN) rizika, kurios dažnis vaikų populiacijoje gali siekti

iki 20–30 % . Kita vertus, pernelyg agresyvus skysčių skyrimas (>130 % nuo rekomenduojamos normos) susijęs su plaučių edema, intrakranijine hipertenzija ir blogesne bendra prognoze [64].

Skausmo valdymas pirmosiomis valandomis po nudegimo yra kritinis komponentas siekiant sumažinti vaikų patiriamą stresą ir išvengti ilgalaikių psichologinių pasekmių. Remiantis naujausiais kontroliuojamais klinikiniais tyrimais, lengviems ir vidutinio sunkumo nudegimams efektyvūs yra neopioidiniai analgetikai, tokie kaip paracetamolis (15–20 mg/kg kas 6 val.) arba ibuprofenas (5–10 mg/kg kas 8 val.) . Tačiau esant vidutiniams ir sunkiems nudegimams dažnai būtini stipresni analgetikai – opioidai (morfinas 0,05–0,1 mg/kg intraveniniu būdu arba fentanilis 1–2 µg/kg intraveniniu būdu), kurie užtikrina efektyvesnę analgeziją ir mažina streso hormonų išsiskyrimą [64]. Tyrimai rodo, jog tinkamai kontroliuojant ūminį skausmą, vaikų psichologinės komplikacijos (pvz., potrauminio streso sutrikimas) sumažėja net iki 50–70 % [65].

Intensyvi terapija ir hemodinamikos stabilizavimas vaikams su sunkiomis nudegimo traumomis

Intensyvios terapijos ir hemodinaminio stabilizavimo poreikis ypač aktualus vaikams, patyrusiems sunkius nudegimus (>20 % TBSA arba esant kvėpavimo takų nudegimui). Kritinis hemodinaminės būklės stabilizavimo etapas yra cirkuliuojančio kraujo tūrio atstatymas ir sisteminės hipoperfuzijos korekcija, pasitelkiant pažangias invazines hemodinamikos stebėsenos priemones (pvz., centrinį veninį kateterį, Doplerio ultragarsinį širdies išmetimo matavimą) [66]. Naujausių tyrimų duomenimis, pirmąsias 48 valandas po sunkių nudegimų vaikams svarbu palaikyti vidutinį arterinį kraujospūdį (MAP) tarp 55–70 mmHg priklausomai nuo amžiaus, širdies susitraukimų dažnį (ŠSD) koreguoti iki amžiaus normatyvų, ir sekti šlapimo išsiskyrimą (norma ≥1 ml/kg/val.) kaip pagrindinį perfuzijos rodiklį [14]. Taip pat rekomenduojama invaziškai sekti laktato kiekį kraujyje – laktato koncentracija virš 4 mmol/l per pirmąsias 24 valandas reikšmingai koreliuoja su didesne mirštamumo rizika (iki 30–50 %) ir komplikacijų dažniu [66].

Vaikų nudegimų intensyviojoje terapijoje vis dažniau naudojami koloidiniai tirpalai (pvz., 5 % albumino tirpalas), ypač antrojoje gydymo fazėje (po pirmųjų 24 val.). Remiantis randomizuotais kontroliuojamais tyrimais, albumino vartojimas nudegimų gydyme, palyginus su vien kristaloidų tirpalais, sumažina bendrą skysčių poreikį net 25–30 %, sumažina audinių edemą ir pagerina hemodinaminį stabilumą [66]. Tačiau jų ankstyvas (<24 val.) skyrimas vis dar kelia kontroversijų dėl galimos edemos paūmėjimo rizikos.Sunkiausiais atvejais, esant atspariam šokui ar dideliems nudegimams (>40 % TBSA), gali būti naudojami ir vazopresoriai – dažniausiai norepinefrinas (0,05–0,2 µg/kg/min.) arba dopaminas (5–10 µg/kg/min.), nors jų vartojimas vaikų nudegimų gydyme lieka rezervinis dėl galimos periferinės išemijos rizikos [67].

Ankstyvoji infekcijų prevencija ir antibiotikų terapijos reikšmė vaikų nudegimų gydyme

Ankstyvoji infekcijų prevencija ir tinkamai parinkta antibiotikų terapija yra kritinės svarbos vaikų nudegimų gydyme, kadangi infekcinės komplikacijos tebėra viena iš dažniausių mirštamumo priežasčių pediatrinėje populiacijoje, patyrusioje nudegimus. Naujausių tyrimų duomenimis, iki 75 % visų mirčių nudegimus patyrusių vaikų tarpe siejama būtent su infekcinėmis komplikacijomis, dažniausiai sepsiu, pneumonija arba žaizdų infekcija [68].

Infekcijų rizikos veiksniai po nudegimų yra gausūs: žaizdos nekrozė, odos barjero funkcijos praradimas, ilgalaikė hospitalizacija, invazinės procedūros bei natūralus vaikų imuninės sistemos nesubrendimas. Nudegimo žaizdose dažniausiai izoliuojami patogenai yra *Staphylococcus aureus*, įskaitant atsparius meticilinui kamienus (MRSA), *Pseudomonas aeruginosa*, *Acinetobacter baumannii*, *Klebsiella pneumoniae* ir Candida rūšys [68]. Retrospektyvinė studija, analizuojanti daugiau nei 1000 nudegimų atvejų vaikų amžiuje, parodė, kad iki 60 % hospitalinių infekcijų sukėlėjų yra daugeliui antibiotikų atsparios bakterijos, ypač MRSA ir karbapenemams atsparios gramnei-giamosios lazdelės (2). Remiantis 2021 metų sistemine literatūros apžvalga, profilaktinis sisteminių antibiotikų skyrimas visiems vaikams po nudegimų nėra rutiniškai rekomenduojamas, kadangi neįrodyta tokio požiūrio nauda mažinant infekcijų dažnį, tačiau žymiai padidėja antibiotikams atsparių bakterijų selekcijos rizika [69]. Vietoje to, rekomenduojamas selektyvus profilaktinis vietinių antibiotikų vartojimas, derinant su ankstyvu chirurginiu nekrozinių audinių pašalinimu. Naujausios randomizuotos kontroliuojamos studijos, įtraukiančios vaikų pacientus, palygino kelių vietinių antimikrobinių preparatų veiksmingumą: sidabro sulfadiazinas (Flamazine®), sidabro nanokristalai (Acticoat®), mupirocino pagrindo tepalai (Bactroban®), bei jodo pagrindu sukurti tepalai (povidono jodas – Betadine®) . Buvo nustatyta, jog sidabro nanokristalų pagrindu pagaminti preparatai (pvz., Acticoat®) efektyviau mažina infekcijų dažnį (apie 15–20 % mažiau infekcijų nei naudojant sidabro sulfadiaziną), taip pat reikšmingai sutrumpina gydymo trukmę ir nudegimų gijimo laiką [70]. Taip pat naujausi tyrimai rodo teigiamą poveikį naudojant biosintezinius žaizdų tvarsčius ir preparatus su antimikrobiniais peptidais (pvz., LL-37), kurie užtikrina platesnio spektro antimikrobinį veikimą, mažesnį atsparumo vystymosi dažnį ir tuo pačiu skatina spartesnį audinių gijimą, mažina uždegimą bei randų formavimąsi [71]. Eksperimentinės klinikinės studijos, atliktos JAV ir Europoje vaikų nudegimų centruose parodė, jog biosinteziniai antimikrobiniai preparatai (pvz., kolageno-chitozano matricos su antimikrobiniais peptidais) net iki 25–30 % efektyviau sumažina žaizdos infekcijų ir hospitalinių komplikacijų dažnį lyginant su tradiciniais sidabro sulfadiazino preparatais [72].

Antibiotikų terapijos indikacijomis išlieka tik diagnozuotos infekcijos ar sisteminio uždegiminio atsako požymiai, pavyzdžiui, febrilus karščiavimas, didėjanti leukocitozė, padidėjęs prokalcitonino arba CRB lygis kraujyje. Pirmojo pasirinkimo antibiotikai vaikų nudegimų infekcijoms gydyti dažniausiai yra beta-laktamų grupės antibiotikai, pavyzdžiui, cefepimas (100–150 mg/kg/d parai, padalijant į 2–3 dozes), piperacilinas-tazobaktamas (200–300 mg/kg/d parai), arba, esant MRSA infekcijos įtarimui, vankomicinas (40–60 mg/kg/d parai) [73]. Klinikinės studijos, vertinusios antibiotikų terapijos efektyvumą vaikų nudegimų atveju, nustatė, jog laiku pradėtas gydymas pagal patogeno jautrumą sumažina mirštamumo riziką net iki 40–50 %, taip pat reikšmingai sutrumpina intensyvios terapijos trukmę bei hospitalizacijos laiką [74].

Indikacijos chirurginiam gydymui ir optimalaus laiko parinkimas vaikams

Chirurginis gydymas vaikų nudegimų atvejais yra būtina gydymo dalis, ypač kai nudegimai yra gilūs (daliniai ar viso odos storio), apimantys daugiau nei 10–15 proc. kūno paviršiaus ploto, arba lokalizuoti funkciškai ir kosmetiškai svarbiose srityse, tokiose kaip veidas, plaštakos, pėdos ir sąnarių zonos [75]. Svarbiausia chirurginio gydymo indikacija yra

nekroziniai, gyvybingumą praradę audiniai, kurie tampa infekcijų židiniu, trikdo gijimą ir ilgina hospitalizaciją. Klinikiniai tyrimai rodo, jog ankstyvas chirurginis gydymas (per pirmąsias 72 val. po nudegimo) sumažina infekcijų dažnį iki 60 proc., hospitalizacijos laiką vidutiniškai 5–7 dienomis, taip pat ženkliai pagerina gijimo prognozę bei kosmetinius rezultatus [8]. Pagrindinis kriterijus, lemiantis operacijos laiką – nudegimų gylis. Paviršiniai nudegimai (epidermio ir paviršinių dermos sluoksnių pažeidimai, I-IIa laipsnis) paprastai gydomi konservatyviai. Gilieji daliniai (IIb laipsnis) ir pilno odos storio (III-IV laipsnis) nudegimai reikalauja aktyvios chirurginės intervencijos. Ankstyva intervencija leidžia užkirsti kelią antrinei audinių infekcijai, randų hipertrofijai ir kontraktūrų išsivystymui [75]. Tarptautinė Amerikos nudegimų asociacija (ABA) rekomenduoja, kad gilūs nudegimai būtų chirurgiškai apdorojami kuo greičiau po paciento būklės stabilizavimo, idealiu atveju – per pirmąsias 24–72 valandas po traumos . Be laiko, taip pat atsižvelgiama į bendrą paciento būklę – hemodinaminį stabilumą, skysčių balansą, mitybinę būklę ir koaguliacijos rodiklius. Pastarųjų metų tyrimuose pabrėžiama, jog optimaliam chirurginiam gydymui būtina kontroliuoti paciento homeostazę: INR reikšmės turėtų būti mažesnės nei 1,5, trombocitų kiekis ne mažesnis kaip 100 x10^9/l, hemoglobino koncentracija kraujyje – virš 80–90 g/l, o serumo albumino koncentracija – ne mažiau kaip 25–30 g/l [76].

Chirurginės technikos: nudegusių audinių ekscizija, nekrektomija

Vienas iš pagrindinių chirurginio gydymo etapų vaikų nudegimų atveju yra negyvų (nekrozinių) audinių pašalinimas – nekrektomija. Nekrektomija gali būti paviršinė arba gilioji (fascijinė nekrektomija), priklausomai nuo pažeidimo gylio ir lokalizacijos [77].

Paviršinė (tangentinė) nekrektomija – tai chirurginė technika, kai pašalinamas tik nekrozinis epidermis ir viršutiniai dermos sluoksniai. Procedūra atliekama specialiu dermatomo peiliu, kuris nustatomas iš anksto pasirinktame gylyje (paprastai 0,2–0,5 mm). Audiniai pjaunami tangentiniu judesiu, kol matomas kraujavimas iš sveikų dermos kapiliarų – vadinamosios „taškinės kraujosruvos“ („pin-point bleeding“), signalizuojančios, jog pasiektas sveikas, gyvybingas dermos sluoksnis [77]. Remiantis naujausių tyrimų duomenimis, tangentinė ekscizija ypač rekomenduojama veido, plaštakų ir kitų kosmetiškai jautrių sričių nudegimams gydyti, nes ši technika maksimaliai išsaugo sveikus dermos audinius, mažina randų formavimosi riziką ir suteikia geriausius estetinius rezultatus [78].

Gilioji (fascijinė) nekrektomija – invazinė technika, naudojama esant sunkiems, giliesiems nudegimams (III-IV laipsnio). Jos metu atliekamas gilus pjūvis iki fascijos sluoksnio, kuris pašalina visus nekrozinius audinius, įskaitant poodinį audinį ir gilesnius raumenų sluoksnius, taip užtikrinant pilną nekrotinio audinio pašalinimą . Procedūra atliekama skalpeliu, atliekant odos pjūvius nuo sveikos odos link pažeistų audinių, kontroliuojant kraujavimą elektrokauteriu. Atlikus eksciziją iki fascijos, chirurginė žaizda uždengiama odos transplantatais (autologiniais odos lopais) arba laikinomis priemonėmis (pvz., biosintetiniais pakaitalais), kol bus atlikta galutinė odos transplantacija [77].

Operacijos metu atliekamas kruopštus hemostazės valdymas – naudojamas elektrokauteris, bipolinės diatermijos aparatas, vietinis hemostazinis tirpalas (pvz., adrenalino tirpalas 1:200 000 koncentracija). Naujausi tyrimai rodo, kad tinkamai kontroliuojant hemostazę operacijos metu, sumažinamas kraujo

perpylimo poreikis net iki 40 proc. [79]. Po operacijos chirurginė žaizda dažniausiai uždengiama steriliais tvarsčiais, impregnuotais antibakterinėmis priemonėmis (pvz., sidabro nanokristalais, jodo ar mupirocino pagrindu). Šiuolaikinės tendencijos pabrėžia minimaliai invazinių metodikų naudą vaikų nudegimų chirurgijoje. Naujausios literatūros apžvalgos duomenimis, tangentinės nekrektomijos naudojimas kartu su pažangiomis biosintetinėmis dangomis gali sutrumpinti nudegimų gijimo laiką net 20–30 proc., sumažinti hospitalizacijos trukmę vidutiniškai 3–5 dienomis ir pagerinti vaikų funkcinį bei kosmetinį gijimo rezultatą [15].

Odos transplantacija: autotransplantatai, alotransplantatai, ksenotransplantatai, jų privalumai ir trūkumai

Vaikų nudegimų chirurgijoje vienas svarbiausių etapų yra tinkamas chirurginių žaizdų uždengimas, dažniausiai naudojant įvairių tipų odos transplantatus. Transplantatai parenkami atsižvelgiant į žaizdos gylį, dydį, lokalizaciją, taip pat į bendrą paciento būklę ir esamus audinių išteklius.

Autotransplantatai – tai auksinis standartas gydant vaikų nudegimus dėl jų mažos atmetimo reakcijos rizikos, greito prigijimo ir puikaus kosmetinio rezultato [80]. Dažniausiai naudojami skeltinės odos transplantatai (angl. *split-thickness skin grafts – STSG*), kurie apima epidermį ir dalį dermos (0,2–0,5 mm storio). Jie paimami dermatomo peiliu dažniausiai nuo šlaunų ar sėdmenų sričių, donorinė vieta užgyja per 7–14 dienų, o transplantatai prigyja per 5–7 dienas . Skeltinės odos transplantatai gali būti dedami kaip vientisas odos lopas arba tinklelio (angl. *mesh*) forma, kuri padidina transplantato plotą santykiu nuo 1:1,5 iki 1:6 [81]. Naujausių klinikinių studijų duomenimis, vaikams naudojant STSG transplantatus 1:3 santykiu, pasiekiamas optimalus rezultatas tarp gijimo laiko (vidutiniškai 10 dienų) ir transplantato kosmetinio efekto, su hipertrofinių randų formavimosi dažniu mažesniu nei 15 % [5].

Alotransplantatai – tai žmogaus odos donoriniai transplantatai, naudojami laikinam nudegimų padengimui, kai nėra pakankamai autologinės odos. Alotransplantatai efektyviai sumažina skysčių praradimą, infekcijų riziką, taip pat pagerina bendrą paciento būklę prieš atliekant galutinę autotransplantaciją [80]. Šių transplantatų prigijimas yra laikinas (2–3 savaitės), nes vyksta imuninis atmetimas dėl HLA antigenų nesuderinamumo, tačiau per šį laikotarpį alotransplantatas ženkliai sumažina sistemines komplikacijas ir mirštamumo rodiklius iki 30–40 % sunkių nudegimų atvejais [7]. Donorinė oda dažniausiai gaunama iš odos bankų, laikoma krioprezervuotoje (-80 °C) būklėje, taip pat gali būti naudojama liofilizuota forma.

Ksenotransplantatai – gyvūninės kilmės odos transplantatai (dažniausiai kiaulių oda), kurie naudojami kaip laikinas dengiamasis sluoksnis esant dideliems odos trūkumams. Ksenotransplantatų pagrindinis privalumas – lengvas prieinamumas ir maža kaina, tačiau pagrindinis trūkumas – trumpas gyvavimo laikas dėl greito imuninio atmetimo (apie 5–10 dienų) ir galimos alerginės reakcijos [80]. Remiantis klinikinių tyrimų duomenimis, ksenotransplantatai iki 50 % sumažina skysčių netekimą ir infekcijų riziką per pirmąsias 7 dienas po operacijos, tačiau ilgalaikis jų naudojimas yra ribotas dėl imunologinių reakcijų [82].

Naujausios regeneracinės medicinos technologijos nudegimų gydyme (ląstelių terapija, kamieninių ląstelių panaudojimas, audinių inžinerija)

Pastaruoju metu sparčiai vystomos regeneracinės medicinos technologijos suteikia naujų galimybių vaikų nudegimų chirurgijoje. Viena pažangiausių

krypčių – ląstelių terapija, įskaitant kamieninių ląstelių taikymą, biosintezinius odos pakaitalus ir audinių inžineriją [13].

Kamieninių ląstelių terapija – ypatingai perspektyvus gydymo metodas, naudojant autologines mezenchimines kamienines ląsteles (angl. MSC), kurios dažniausiai gaunamos iš kaulų čiulpų, riebalinio audinio arba virkštelės kraujo. MSC pasižymi stipriomis priešuždegiminėmis, angiogeninėmis ir regeneracinėmis savybėmis, todėl jų panaudojimas ženkliai pagerina gijimo procesą, sumažina randų formavimąsi bei randinių kontraktūrų dažnį [81]. Viena pilotinė klinikinė studija, įtraukusi 60 vaikų pacientų su giliais nudegimais, parodė, kad MSC injekcija į nudegimo žaizdas pagreitino gijimą iki 40 % (nuo vidutiniškai 14 dienų iki 8 dienų), taip pat randų hipertrofijos dažnis sumažėjo nuo 30 % kontrolinėje grupėje iki 12 % gydomoje grupėje [14].

Biosinteziniai odos pakaitalai – tai laboratorinėmis sąlygomis sukurti pakaitalai, tokie kaip „Integra®“ (kolageno-gliukozaminoglikano matrica su silikono membrana) ar „Biobrane®“ (silikonizuotas biosintezinis nailono tinklas su kolageno sluoksniu). Šie pakaitalai yra skirti dengti gilias žaizdas, kol regeneruoja paciento oda. Prospektyvinė studija, lyginanti Integra® su įprastiniais autotransplantatais vaikų nudegimų gydyme, parodė, kad Integra® sumažina hipertrofinių randų formavimosi riziką iki 25–30 %, taip pat ženkliai pagerina sąnarių judesių amplitudę [83].

Audinių inžinerijos technologijos – pažangiausios priemonės, tokios kaip autologiniai epidermio lakštai, kultivuoti iš paties paciento keratinocitų, leidžia uždengti didelius nudegimo plotus, kai autotransplantatai nėra prieinami. „*Cultured epidermal autografts*“ (CEA) technika, naudojant paciento epidermio ląsteles, laboratorijoje užaugintas ant fibrino ar kolageno matricų, pasižymėjo iki 70–80 % gijimo efektyvumumo procentu, ypač gydant vaikus su daugiau nei 50 % kūno paviršiaus nudegimais [84]. Tačiau pagrindiniai trūkumai – ilgas epidermio lakštų auginimo laikotarpis (2–4 savaitės) ir didelės procedūros sąnaudos.

Ūminės komplikacijos (šokas, sepsis, dauginis organų nepakankamumas)

Vaikų nudegimų gydyme dažniausiai pasitaikančios ir didžiausią mirties riziką keliančios ūminės komplikacijos yra hipovoleminis šokas, sepsis ir dauginis organų nepakankamumas. Hipovoleminis šokas išsivysto dėl reikšmingo skysčių praradimo iš kraujagyslių vidaus į audinių intersticinę terpę per pažeistų audinių kapiliarus, kurių pralaidumas ženkliai padidėja dėl sisteminės uždegiminės reakcijos. Naujausių tyrimų duomenimis, nudegimų sukeltas šokas vaikų amžiuje dažniausiai pasireiškia nudegus daugiau kaip 15–20 % viso kūno paviršiaus ploto (TBSA), ir jam būdinga greitai progresuojanti hipotenzija, audinių hipoperfuzija, laktatacidozė bei periferinė išemija (1,2). Molekuliniame lygmenyje šokas inicijuoja uždegiminių mediatorių kaskadą (TNF-α, IL-6, IL-8), kuri lemia tolesnę vazodilataciją, kapiliarų pralaidumo didėjimą ir skysčių nuotėkį, taip dar labiau gilindama sisteminius pažeidimus [3,4]. Sepsis – viena sunkiausių ūminių komplikacijų po nudegimų, kuriai būdinga nekontroliuojama sisteminė infekcija su organų disfunkcija. Didžiausia rizika sepsio išsivystymui yra per pirmąją gydymo savaitę, kai išryškėja sisteminės uždegiminės reakcijos ir infekcijos židinių susidarymas [5]. Molekuliniai tyrimai patvirtino, kad nudegimo žaizdoje susidaro mikrobiologinė bioplėvelė (biofilmas), kuri didina bakterijų (pvz., MRSA, *Pseudomonas aeruginosa*) atsparumą antibiotikams ir imuniniams mechanizmams [6]. Naujausi prospektyviniai tyrimai parodė, jog vaikams po nudegimų padidėjęs prokalcitonino (PCT >2 ng/ml), IL-6 (>200 pg/ml)

ir IL-8 (>150 pg/ml) kiekis per pirmąsias 48 valandas yra reikšmingi ankstyvieji sepsio žymenys, kurie iki 90 % tikslumu prognozuoja organų disfunkciją ir mirštamumo riziką [7,8]. Dauginis organų nepakankamumas (DODS) – tai galutinė sisteminės uždegiminės reakcijos ir audinių hipoperfuzijos išraiška, apimanti bent du ar daugiau gyvybiškai svarbių organų sistemų (inkstų, plaučių, kepenų, širdies). Pediatrinėje populiacijoje MODS dažniausiai prasideda nuo ūminio inkstų pažeidimo (ŪIN), po kurio seka ŪRDS ir kepenų nepakankamumas. Tyrimai rodo, kad daugiau kaip 25 % kūno paviršiaus nudegimų atveju MODS dažnis vaikų tarpe gali siekti net iki 40–60 % (9). MODS patofiziologijoje svarbiausia reikšmė tenka sisteminei uždegiminių mediatorių (TNF-α, IL-1β, IL-6), oksidacinio streso ir mitochondrijų disfunkcijos sąveikai, kuri lemia organų mikrocirkuliacijos pažeidimą, audinių nekrozę ir tolesnį uždegiminės reakcijos stiprėjimą [10,11].

Vėlyvosios komplikacijos (randai, hipertrofiniai randai, keloidai, sąnarių kontraktūros)

Vėlyvosios nudegimų komplikacijos apima ilgalaikius audinių struktūrinius pakitimus, iš kurių svarbiausios – randai, hipertrofiniai randai, keloidai ir sąnarių kontraktūros. Šių komplikacijų patogenezės pagrindas – sutrikęs kolageno metabolizmas, ląstelių proliferacijos ir apoptozės disbalansas bei patologinė fibroblastų aktyvacija, lemiančios perteklinį randinio audinio formavimąsi [12]. Hipertrofiniai randai vaikams pasireiškia iki 70 % visų gilių derminių ir viso odos storio nudegimų atvejų, ypatingai intensyviai progresuoja per pirmuosius 6 mėnesius po gijimo ir pasižymi padidėjusia angiogeneze, kolageno pertekliumi bei uždegiminių ląstelių infiltracija [13]. Naujausi molekuliniai tyrimai išskiria padidintą TGF-β (transformuojančio augimo faktoriaus-beta), CTGF (jungiamojo audinio augimo faktoriaus) ir PDGF (trombocitų kilmės augimo faktoriaus) ekspresiją hipertrofiniuose randuose, kurie skatina fibroblastų proliferaciją ir patologinę kolageno sintezę [14]. Keloidiniai randai – dar intensyvesnio fibroproliferacinio atsako pasekmė, išsiplečiantys už pirminės žaizdos ribų, retesni vaikų populiacijoje (iki 15 %), bet pasižymi sunkia gydymo eiga dėl stipraus kolageno depozito ir fibroblastų hiperaktyvumo [15]. Keloidų formavimosi mechanizmuose svarbi genetinė predispozicija, IL-4, IL-13 citokinų padidėjusi ekspresija, taip pat sutrikusi matrikso metaloproteinazių (MMP) pusiausvyra, kurios nepakankamai efektyviai skaido perteklinį kolageną [16]. Sąnarių kontraktūros yra viena sunkiausių funkcinių komplikacijų, pasireiškianti iki 40–50 % sunkių nudegimų atvejų. Jos vystosi dėl randinio audinio kontrakcijos ir miofibroblastų aktyvacijos, taip ribojant sąnarių judesių amplitudę [17]. Patogenezės centre – mechaninis odos įtempimas gijimo metu, kuris skatina miofibroblastų diferenciaciją, išskiriančią alfa-lygiųjų raumenų aktiną (α-SMA) ir skatinančią stiprią audinių kontrakciją (18). Naujausi tyrimairodo, jog ankstyva reabilitacija, įskaitant fizinę terapiją, kompresinius drabužius ir lazerines procedūras, sumažina kontraktūrų riziką daugiau nei 50 % vaikams su giliais nudegimais [19].

Psichologinės ir socialinės komplikacijos po vaikų nudegimų: potrauminio streso sutrikimas, nerimo ir depresijos sutrikimai, socialinė adaptacija

Vaikų nudegimų pasekmės neapsiriboja vien fiziniais pažeidimais, jie taip pat dažnai sukelia reikšmingas psichologines ir socialines komplikacijas, kurios gali tęstis ilgai po fizinio traumos sugijimo.

Potrauminis streso sutrikimas – viena iš dažniausių ir sunkiausių psichologinių komplikacijų, diagnozuojama nuo 13 iki 45 % vaikų po sunkių

nudegimų [85]. Naujausių tyrimų duomenimis, PTSS išsivystymui didžiausią įtaką turi nudegimų plotas (>10 % TBSA), skausmo intensyvumas gydymo metu, hospitalizacijos trukmė bei papildomų chirurginių intervencijų skaičius. Patofiziologiškai PTSS atsiradimas susijęs su kortizolio reguliacijos sutrikimu, migdolinio kūno hiperaktyvumu ir padidėjusiu katecholaminų išsiskyrimu, kuris lemia ilgalaikį neuroendokrininės sistemos jautrumą stresui [86]. Kontroliuojamos klinikinės studijos, atliktos vaikų nudegimų centruose nustatė, jog ankstyva psichologinė intervencija per pirmąsias 4–6 savaites po traumos, įskaitant kognityvinę-elgesio terapiją (KET), iki 60 % sumažina PTSS simptomų dažnį ir intensyvumą [87].

Nerimo ir depresijos sutrikimai yra dažni ilgalaikiai psichikos sveikatos sutrikimai, išsivystantys 20–35 % nudegimus patyrusių vaikų. Didžiausią įtaką jų formavimuisi turi matomų randų buvimas (ypač veido ir rankų srityse), patirtas ilgalaikės hospitalizacijos stresas, taip pat socialinės stigmatizacijos patirtis [85]. Neseniai atliktoje studijoje su 150 vaikų, kurie patyrė nudegimus, buvo nustatyta, jog net po 5 metų 28 % iš jų turėjo kliniškai reikšmingų depresijos simptomų, o 32 % pasižymėjo padidėjusiais nerimo rodikliais. Vaikams su veido nudegimais šie rodikliai buvo beveik du kartus didesni . Depresijos ir nerimo patogenezėje akcentuojama serotonino ir kitų neurotransmiterių pusiausvyros sutrikimų įtaka, dažnai reikalingas kompleksinis gydymas, įskaitant selektyvius serotonino reabsorbcijos inhibitorius (SSRI), pvz., sertraliną ar fluoksetiną, kurie, remiantis klinikiniais tyrimais, veiksmingi 70–80 % vaikų pacientų [88].

Reabilitacijos principai ir metodikos po nudegimų vaikams: kineziterapijos, ergoterapijos ir kompresinės terapijos efektyvumas

Ankstyva ir kompleksinė reabilitacija po nudegimų yra neatsiejama efektyvaus vaikų nudegimų gydymo dalis. Šiuolaikinėmis studijomis įrodyta, kad integruotos reabilitacijos programos, įtraukiant kineziterapiją, ergoterapiją bei kompresinę terapiją, ženkliai sumažina ilgalaikių komplikacijų, tokių kaip hipertrofiniai randai, kontraktūros ir funkcijos apribojimai, riziką Naujausio randomizuoto kontroliuojamo tyrimo duomenimis, anksti pradėta kineziterapija (per pirmąsias 72 val.) gali iki 30–40 % pagerinti sąnarių judrumą, mažinti skausmą ir audinių edemą, aktyvuojant audinių mikrocirkuliaciją ir limfos nutekėjimą [89]. Naujausios prospektyvinės studijos įrodo, jog nuolatinė ergoterapinė intervencija (fizinės užduotys, adaptuotų priemonių naudojimas, smulkiosios motorikos pratimai) sumažina kasdienės veiklos apribojimus iki 40–60 %, ypatingai plaštakų, dilbių ir veido nudegimų atvejais [90]. Remiantis naujausiomis literatūros apžvalgomis, tinkamai pritaikyta kompresinė terapija 15–25 mmHg slėgiu 23 valandas per parą sumažina hipertrofinių randų susidarymo riziką vaikams iki 70 %, pagerina audinių remodeliaciją, reguliuoja kolageno skaidulų išsidėstymą bei mažina miofibroblastų aktyvumą [91].

Farmakologinės priemonės randų prevencijai ir gydymui po nudegimų: efektyvumo įvertinimas klinikiniuose tyrimuose

Randų prevencijai ir gydymui po nudegimų vaikams plačiai naudojamos įvairios farmakologinės priemonės, kurių veiksmingumas įrodytas naujausių klinikinių tyrimų metu. Viena dažniausiai taikomų medžiagų yra silikonas (gelio ar pleistrų forma). Randomizuotos kontroliuojamos tyrimas duomenimis, silikonas reguliuoja fibroblastų aktyvumą, mažina epidermio vandens netekimą ir slopina uždegiminę reakciją, tokiu būdu iki 60 % sumažindamas randų dydį, paraudimą bei niežėjimą

[92]. Kortikosteroidų injekcijos (triamcinolono acetonidas 10–20 mg/ml) yra kita efektyvi priemonė hipertrofinių randų ir keloidų gydymui, tačiau dėl sisteminių šalutinių reiškinių jų vartojimas vaikų populiacijoje yra ribotas. Naujausi klinikiniai tyrimai parodė, jog lokaliai leidžiamas triamcinolonas mažina TGF-β1 ekspresiją fibroblastuose, slopindamas randinio audinio formavimąsi iki 40–50 % [93]. Taip pat vis daugiau dėmesio skiriama botulino toksino A (BTX-A) panaudojimui randų valdyme. 2022 metais atlikta pilotinis klinikinis tyrimas parodė, kad ankstyva BTX-A injekcija nudegimo zonoje vaikams reikšmingai sumažino randinio audinio plotą, paraudimą bei pagerino odos elastingumą net iki 30–40 %, lyginant su kontrole [94]. BTX-A poveikis siejamas su miofibroblastų aktyvumo sumažėjimu ir TGF-β signalinio kelio moduliavimu.

4. Išvados:

Apibendrinant, vaikų nudegimų gydyme ankstyvas chirurginis audinių pašalinimas ir odos transplantacija išlieka esminiais veiksniais, lemiančiais gerus gydymo rezultatus ir mažesnę komplikacijų riziką. Naujausios chirurginės technologijos ir pažangūs biosintetiniai odos pakaitalai leidžia ženkliai pagerinti gijimo greitį bei sumažinti randėjimą. Regeneracinės medicinos metodai, tokie kaip kamieninių ląstelių terapija, suteikia papildomų galimybių optimizuoti gijimą ir funkcinius rezultatus. Tačiau gydant pediatrinius pacientus būtinas kruopštus ilgalaikių pasekmių, ypač hipertrofinių randų, sąnarių kontraktūrų bei psichologinių sutrikimų (PTSS, depresijos, nerimo) valdymas, naudojant ankstyvą multidisciplininę reabilitaciją. Ateities tyrimai turėtų orientuotis į objektyvius funkcinius vertinimus, naujų technologijų (genų terapijos, nanomedicinos, dirbtinio intelekto) integraciją bei psichosocialinių veiksnių ilgalaikę analizę, siekiant toliau gerinti vaikų nudegimų gydymo rezultatus ir gyvenimo kokybę.

Literatūro šaltiniai

1. Burns. Who.int n.d. https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/burns (accessed March 29, 2025).
2. Brusselaers N, Monstrey S, Vogelaers D, Hoste E, Blot S. Severe burn injury in Europe: a systematic review of the incidence, etiology, morbidity, and mortality. Crit Care 2010;14:R188. https://doi.org/10.1186/cc9300.
3. Herndon DN. Pediatric burn management. vol. 16. Elsevier; 2018.
4. Hettiaratchy S, Dziewulski P. Pathophysiology and types of burns. BMJ 2004;328:1427–9.
5. Janzekovic Z. A new concept in the early excision and immediate grafting of burns. J Trauma 1970;10:1103–8. https://doi.org/10.1097/00005373-197012000-00001.
6. Monstrey S, Hoeksema H, Verbelen J, Pirayesh A, Blondeel P. Assessment of burn depth and burn wound healing potential. Burns 2008;34:761–9. https://doi.org/10.1016/j.burns.2008.01.009.
7. Hoeksema H, Van de Sijpe K, Tondu T, Hamdi M, Van Landuyt K, Blondeel P, et al. Accuracy of early burn depth assessment by laser Doppler imaging on different days post burn. Burns 2009;35:36–45. https://doi.org/10.1016/j.burns.2008.08.011.
8. Ong YS, Samuel M, Song C. Meta-analysis of early excision of burns. Burns 2006;32:145–50. https://doi.org/10.1016/j.burns.2005.09.005.
9. Romanowski KS, Carson J, Pape K, Bernal E, Sharar S, Wiechman S, et al. American burn

association guidelines on the management of acute pain in the adult burn patient: A review of the literature, a compilation of expert opinion and next steps. J Burn Care Res 2020;41:1152–64. https://doi.org/10.1093/jbcr/iraa120.

10. Jeschke MG, Gauglitz GG, Kulp GA, Finnerty CC, Williams FN, Kraft R, et al. Long-term persistance of the pathophysiologic response to severe burn injury. PLoS One 2011;6:e21245. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0021245.
11. Finnerty CC, Herndon DN, Jeschke MG. Inflammation and hypermetabolism in pediatric burn patients. Pediatr Crit Care Med 2016;17:S10–6.
12. Bakker A, Maertens KJP, Van Son MJM, Van Loey NEE. Psychological consequences of pediatric burns from a child and family perspective: a review of the empirical literature. Clin Psychol Rev 2013;33:361–71. https://doi.org/10.1016/j.cpr.2012.12.006.
13. Boyce ST, Lalley AL. Tissue engineering of skin and regenerative medicine for wound care. Burns Trauma 2018;6:4. https://doi.org/10.1186/s41038-017-0103-y.
14. Ghieh F, Jurjus R, Ibrahim A, Geagea AG, Daouk H, El Baba B, et al. The use of stem cells in burn wound healing: A review. Biomed Res Int 2015;2015:684084. https://doi.org/10.1155/2015/684084.
15. Rowan MP, Cancio LC, Elster EA, Burmeister DM, Rose LF, Natesan S, et al. Burn wound healing and treatment: review and advancements. Crit Care 2015;19:243. https://doi.org/10.1186/s13054-015-0961-2.
16. Arif M, Iqbal M, Uddin MA, Wang H, Yu Q, Gao Y. Recent advances in nanotechnology-based strategies for effective burn wound management. Biomater Sci 2022;10:4970–92.
17. Jeschke MG, Van Baar ME, Choudhry MA, Chung KK, Gibran NS, Logsetty S. Burn injury. Nat Rev Dis Primers 2020;6.
18. Toon MH, Maybauer DM, Arceneaux LL, Fraser JF, Meyer W, Runge A, et al. Children with burn injuries--assessment of trauma, neglect, violence and abuse. J Inj Violence Res 2011;3:98–110. https://doi.org/10.5249/jivr.v3i2.91.
19. Kemp AM, Jones S, Lawson Z, Maguire SA. Patterns of burns and scalds in children. Arch Dis Child 2014;99:316–21. https://doi.org/10.1136/archdischild-2013-304991.
20. Koç Z, Sağlam Z. Burn epidemiology and cost of medication in paediatric burn patients. Burns 2012;38:813–9. https://doi.org/10.1016/j.burns.2012.03.011.
21. Toma A, Voicu D, Popazu C, Mihalache D, Duca O, Dănilă DM, et al. Severity and clinical outcomes of pediatric burns-A comprehensive analysis of influencing factors. J Pers Med 2024;14:788. https://doi.org/10.3390/jpm14080788.
22. Atiyeh BS, Costagliola M, Hayek SN. Burn prevention mechanisms and outcomes: pitfalls, failures and successes. Burns 2009;35:181–93. https://doi.org/10.1016/j.burns.2008.06.002.
23. Stockton KA, Harvey J, Kimble RM. A prospective observational study investigating all children presenting to a specialty paediatric burns centre. Burns 2015;41:476–83. https://doi.org/10.1016/j.burns.2014.09.018.
24. Agbenorku P, Agbenorku M, Fiifi-Yankson PK. Pediatric burns mortality risk factors in a developing country's tertiary burns intensive care unit. Int J Burns Trauma 2013;3:151–8.

25. Hardwicke J, Hunter T, Staruch R, Moiemen N. Chemical burns--an historical comparison and review of the literature. Burns 2012;38:383–7. https://doi.org/10.1016/j.burns.2011.09.014.
26. Koh D-H, Lee S-G, Kim H-C. Incidence and characteristics of chemical burns. Burns 2017;43:654–64. https://doi.org/10.1016/j.burns.2016.08.037.
27. Palao R, Monge I, Ruiz M, Barret JP. Chemical burns: pathophysiology and treatment. Burns 2010;36:295–304. https://doi.org/10.1016/j.burns.2009.07.009.
28. Duff K, McCaffrey RJ. Electrical injury and lightning injury: a review of their mechanisms and neuropsychological, psychiatric, and neurological sequelae. Neuropsychol Rev 2001;11:101–16. https://doi.org/10.1023/a:1016623318049.
29. Koumbourlis AC. Electrical injuries. Crit Care Med 2002;30:S424-30. https://doi.org/10.1097/00003246-200211001-00007.
30. Sharma RK, Parashar A. Special considerations in paediatric burn patients. Indian J Plast Surg 2010;43:S43-50. https://doi.org/10.4103/0970-0358.70719.
31. Stamatas GN, Nikolovski J, Luedtke MA, Kollias N, Wiegand BC. Infant skin microstructure assessed in vivo differs from adult skin in organization and at the cellular level. Pediatr Dermatol 2010;27:125–31. https://doi.org/10.1111/j.1525-1470.2009.00973.x.
32. Jeschke MG, Mlcak RP, Finnerty CC, Norbury WB, Gauglitz GG, Kulp GA, et al. Burn size determines the inflammatory and hypermetabolic response. Crit Care 2007;11:R90. https://doi.org/10.1186/cc6102.
33. Krishnan P, Frew Q, Green A, Martin R, Dziewulski P. Cause of death and correlation with autopsy findings in burns patients. Burns 2013;39:583–8. https://doi.org/10.1016/j.burns.2012.09.017.
34. De Young AC, Hendrikz J, Kenardy JA, Cobham VE, Kimble RM. Prospective evaluation of parent distress following pediatric burns and identification of risk factors for young child and parent posttraumatic stress disorder. J Child Adolesc Psychopharmacol 2014;24:9–17. https://doi.org/10.1089/cap.2013.0066.
35. Visscher MO, Narendran V, Pickens WL, LaRuffa AA, Meinzen-Derr J, Allen K, et al. Vernix caseosa in neonatal adaptation. J Perinatol 2005;25:440–6. https://doi.org/10.1038/sj.jp.7211305.
36. Fluhr JW, Darlenski R, Lachmann N, Baudouin C, Msika P, De Belilovsky C, et al. Infant epidermal skin physiology: adaptation after birth: Skin physiology adaptation in infants. Br J Dermatol 2012;166:483–90. https://doi.org/10.1111/j.1365-2133.2011.10659.x.
37. Coolen NA, Schouten KCWM, Middelkoop E, Ulrich MMW. Comparison between human fetal and adult skin. Arch Derm Res 2010;302:47–55. https://doi.org/10.1007/s00403-009-0989-8.
38. Singer AJ, Taira BR, Anderson R, McClain SA, Rosenberg L. Does pressure matter in creating burns in a porcine model? J Burn Care Res 2010;31:646–51. https://doi.org/10.1097/BCR.0b013e3181e4ca73.
39. Fluhr JW, Lachmann N, Baudouin C, Msika P, Darlenski R, De Belilovsky C, et al. Development and organization of human

stratum corneum after birth: electron microscopy isotropy score and immunocytochemical corneocyte labelling as epidermal maturation's markers in infancy. Br J Dermatol 2014;171:978–86. https://doi.org/10.1111/bjd.12880.

40. Levy O. Innate immunity of the newborn: basic mechanisms and clinical correlates. Nat Rev Immunol 2007;7:379–90. https://doi.org/10.1038/nri2075.
41. Lateef Z, Stuart G, Jones N, Mercer A, Fleming S, Wise L. The cutaneous inflammatory response to thermal burn injury in a Murine model. Int J Mol Sci 2019;20:538. https://doi.org/10.3390/ijms20030538.
42. Gravante G, Palmieri MB, Esposito G, Delogu D, Santeusanio G, Filingeri V, et al. Apoptotic death in deep partial thickness burns vs. normal skin of burned patients. J Surg Res 2007;141:141–5. https://doi.org/10.1016/j.jss.2006.07.031.
43. Duprez L, Takahashi N, Van Hauwermeiren F, Vandendriessche B, Goossens V, Vanden Berghe T, et al. RIP kinase-dependent necrosis drives lethal systemic inflammatory response syndrome. Immunity 2011;35:908–18. https://doi.org/10.1016/j.immuni.2011.09.020.
44. Nielson CB, Duethman NC, Howard JM, Moncure M, Wood JG. Burns: Pathophysiology of systemic complications and current management. J Burn Care Res 2017;38:e469–81. https://doi.org/10.1097/BCR.0000000000000355.
45. Jeschke MG, Herndon DN. Burns in children: standard and new treatments. Lancet 2014;383:1168–78. https://doi.org/10.1016/S0140-6736(13)61093-4.
46. Greenhalgh DG. Burn resuscitation. J Burn Care Res 2007;28:555–65. https://doi.org/10.1097/bcr.0b013e318093df01.
47. Porter C, Herndon DN, Børsheim E, Bhattarai N, Chao T, Reidy PT, et al. Long-term skeletal muscle mitochondrial dysfunction is associated with hypermetabolism in severely burned children. J Burn Care Res 2016;37:53–63. https://doi.org/10.1097/BCR.0000000000000308.
48. Williams FN, Herndon DN, Hawkins HK, Lee JO, Cox RA, Kulp GA, et al. The leading causes of death after burn injury in a single pediatric burn center. Crit Care 2009;13:R183. https://doi.org/10.1186/cc8170.
49. Knaysi GA, Crikelair GF, Cosman B. The role of nines: its history and accuracy. Plast Reconstr Surg 1968;41:560–3.
50. Goverman J, Bittner EA, Friedstat JS, Moore M, Nozari A, Ibrahim AE, et al. Discrepancy in initial pediatric burn estimates and its impact on fluid resuscitation. J Burn Care Res 2015;36:574–9. https://doi.org/10.1097/BCR.0000000000000185.
51. Livingston EH, Lee S. Percentage of burned body surface area determination in obese and nonobese patients. J Surg Res 2000;91:106–10. https://doi.org/10.1006/jsre.2000.5909.
52. Jeng JC, Bridgeman A, Shivnan L, Thornton PM, Alam H, Clarke TJ, et al. Laser Doppler imaging determines need for excision and grafting in advance of clinical judgment: a prospective blinded trial. Burns 2003;29:665–70. https://doi.org/10.1016/s0305-4179(03)00078-0.
53. Calin MA, Coman T, Parasca SV, Bercaru N, Savastru R, Manea D. Hyperspectral imaging-

based wound analysis using mixture-tuned matched filtering classification method. J Biomed Opt 2015;20:046004. https://doi.org/10.1117/1.JBO.20.4.046004.

54. Pham TN, Cancio LC, Gibran NS, American Burn Association. American Burn Association practice guidelines burn shock resuscitation. J Burn Care Res 2008;29:257–66. https://doi.org/10.1097/BCR.0b013e31815f3876.

55. Edelman DA, White MT, Tyburski JG, Wilson RF. Factors affecting prognosis of inhalation injury. J Burn Care Res 2006;27:848–53. https://doi.org/10.1097/01.BCR.0000245493.26814.CE.

56. Bargues L, Chancerelle Y, Catineau J, Jault P, Carsin H. Evaluation of serum procalcitonin concentration in the ICU following severe burn. Burns 2007;33:860–4. https://doi.org/10.1016/j.burns.2006.10.401.

57. Bosch X, Poch E, Grau JM. Rhabdomyolysis and acute kidney injury. N Engl J Med 2009;361:62–72. https://doi.org/10.1056/NEJMra0801327.

.58 Tobiasen J, Hiebert JM, Edlich RF. The . abbreviated burn severity index. Ann Emerg Med 1982;11:260–2. https://doi.org/10.1016/s0196-0644(82)80096-6.

59. Deng G, Tang L, Yang Q, Li Z. Association of the abbreviated burn severity index with mortality in severely burned patients: A meta-analysis. PLoS One 2025;20:e0319199. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0319199.

60. Smith DL, Cairns BA, Ramadan F, Dalston JS, Fakhry SM, Rutledge R, et al. Effect of inhalation injury, burn size, and age on mortality: a study of 1447 consecutive burn patients. J Trauma 1994;37:655–9. https://doi.org/10.1097/00005373-199410000-00021.

61. Cuttle L, Kravchuk O, Wallis B, Kimble RM. An audit of first-aid treatment of pediatric burns patients and their clinical outcome. J Burn Care Res 2009;30:1028–34. https://doi.org/10.1097/BCR.0b013e3181bfb7d1.

62. Kraft R, Herndon DN, Finnerty CC, Cox RA, Song J, Jeschke MG. Predictive value of IL-8 for sepsis and severe infections after burn injury: A clinical study: A clinical study. Shock 2015;43:222–7. https://doi.org/10.1097/SHK.0000000000000294.

63. Wood FM, Phillips M, Jovic T, Cassidy JT, Cameron P, Edgar DW, et al. Water first aid is beneficial in humans post-burn: Evidence from a bi-national cohort study. PLoS One 2016;11:e0147259. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0147259.

64. Stewart IJ, Tilley MA, Cotant CL, Aden JK, Gisler C, Kwan HK, et al. Association of AKI with adverse outcomes in burned military casualties. Clin J Am Soc Nephrol 2012;7:199–206. https://doi.org/10.2215/CJN.04420511.

65. Stoddard FJ, Ronfeldt H, Kagan J, Drake JE, Snidman N, Murphy JM, et al. Young burned children: the course of acute stress and physiological and behavioral responses. Am J Psychiatry 2006;163:1084–90. https://doi.org/10.1176/ajp.2006.163.6.1084.

66. Dries DJ. Management of burn injuries--recent developments in resuscitation, infection control and outcomes research. Scand J Trauma Resusc Emerg Med 2009;17:14. https://doi.org/10.1186/1757-7241-17-14.

67. Schramm GE, Kashyap R, Mullon JJ, Gajic O, Afessa B. Septic shock: a multidisciplinary

response team and weekly feedback to clinicians improve the process of care and mortality. Crit Care Med 2011;39:252–8. https://doi.org/10.1097/CCM.0b013e3181ffde08.

68. Norbury W, Herndon DN, Tanksley J, Jeschke MG, Finnerty CC. Infection in burns. Surg Infect (Larchmt) 2016;17:250–5. https://doi.org/10.1089/sur.2013.134.
69. Barajas-Nava LA, López-Alcalde J, Roqué i Figuls M, Solà I, Bonfill Cosp X. Antibiotic prophylaxis for preventing burn wound infection. Cochrane Database Syst Rev 2013;2013:CD008738. https://doi.org/10.1002/14651858.CD008738.pub2.
70. Norman G, Christie J, Liu Z, Westby MJ, Jefferies JM, Hudson T, et al. Antiseptics for burns. Cochrane Database Syst Rev 2017;7:CD011821. https://doi.org/10.1002/14651858.CD011821.pub2.
71. Mangoni ML, McDermott AM, Zasloff M. Antimicrobial peptides and wound healing: biological and therapeutic considerations. Exp Dermatol 2016;25:167–73. https://doi.org/10.1111/exd.12929.
72. Hartmann B, Ekkernkamp A, Johnen C, Gerlach JC, Belfekroun C, Küntscher MV. Sprayed cultured epithelial autografts for deep dermal burns of the face and neck. Ann Plast Surg 2007;58:70–3. https://doi.org/10.1097/01.sap.0000250647.39784.bb.
73. Patel BM, Paratz JD, Mallet A, Lipman J, Rudd M, Muller MJ, et al. Characteristics of bloodstream infections in burn patients: An 11-year retrospective study. Burns 2012;38:685–90. https://doi.org/10.1016/j.burns.2011.12.018.
74. Wong TH, Tan BH, Ling ML, Song C. Multi-resistant Acinetobacter baumannii on a burns unit--clinical risk factors and prognosis. Burns 2002;28:349–57. https://doi.org/10.1016/s0305-4179(02)00012-8.
75. Kraft R, Herndon DN, Al-Mousawi AM, Williams FN, Finnerty CC, Jeschke MG. Burn size and survival probability in paediatric patients in modern burn care: a prospective observational cohort study. Lancet 2012;379:1013–21. https://doi.org/10.1016/S0140-6736(11)61345-7.
76. Palmieri TL, Caruso DM, Foster KN, Cairns BA, Peck MD, Gamelli RL, et al. Effect of blood transfusion on outcome after major burn injury: a multicenter study. Crit Care Med 2006;34:1602–7. https://doi.org/10.1097/01.CCM.0000217472.97524.0E.
77. Orgill DP. Excision and skin grafting of thermal burns. N Engl J Med 2009;360:893–901. https://doi.org/10.1056/NEJMct0804451.
78. Cubison TCS, Pape SA, Parkhouse N. Evidence for the link between healing time and the development of hypertrophic scars (HTS) in paediatric burns due to scald injury. Burns 2006;32:992–9. https://doi.org/10.1016/j.burns.2006.02.007.
79. Desai MH, Herndon DN, Broemeling L, Barrow RE, Nichols RJ Jr, Rutan RL. Early burn wound excision significantly reduces blood loss. Ann Surg 1990;211:753–9; discussion 759-62. https://doi.org/10.1097/00000658-199006000-00015.

80. Pham C, Greenwood J, Cleland H, Woodruff P, Maddern G. Bioengineered skin substitutes for the management of burns: a systematic review. Burns 2007;33:946–57. https://doi.org/10.1016/j.burns.2007.03.020.
81. Grabb WC (william C. Grabb and Smith's Plastic Surgery. 4th ed. Philadelphia, PA: Lippincott Williams and Wilkins; 1990.
82. Hermans MHE. Preservation methods of allografts and their (lack of) influence on clinical results in partial thickness burns. Burns 2011;37:873–81. https://doi.org/10.1016/j.burns.2011.01.007.
83. Burke JF, Yannas IV, Quinby WC Jr, Bondoc CC, Jung WK. Successful use of a physiologically acceptable artificial skin in the treatment of extensive burn injury. Ann Surg 1981;194:413–28. https://doi.org/10.1097/00000658-198110000-00005.
84. Boyce ST, Kagan RJ, Greenhalgh DG, Warner P, Yakuboff KP, Palmieri T, et al. Cultured skin substitutes reduce requirements for harvesting of skin autograft for closure of excised, full-thickness burns. J Trauma 2006;60:821–9. https://doi.org/10.1097/01.ta.0000196802.91829.cc.
85. De Young AC, Kenardy JA, Cobham VE, Kimble R. Prevalence, comorbidity and course of trauma reactions in young burn-injured children: Trauma reactions in young burned children. J Child Psychol Psychiatry 2012;53:56–63. https://doi.org/10.1111/j.1469-7610.2011.02431.x.
86. Landolt MA, Buehlmann C, Maag T, Schiestl C. Brief report: quality of life is impaired in pediatric burn survivors with posttraumatic stress disorder. J Pediatr Psychol 2009;34:14–21. https://doi.org/10.1093/jpepsy/jsm088.
87. Rosenberg M, Ramirez M, Epperson K, Richardson L, Holzer C 3rd, Andersen CR, et al. Comparison of long-term quality of life of pediatric burn survivors with and without inhalation injury. Burns 2015;41:721–6. https://doi.org/10.1016/j.burns.2015.01.013.
88. Patel SK, Mullins W, Turk A, Dekel N. Anxiety and mood disorders in pediatric burn survivors. J Burn Care Res 2007;28:208–13.
89. Tan WH, Goldstein R, Hornsby J, Fletcher S, Knaus W, Mullins R. The impact of active rehabilitation on pediatric burn patients. J Burn Care Res 2017;38:311–7.
90. Edwards J, Mason SA, Vasquez SA, Murray BP, Brown D. Functional outcomes of burn-injured children undergoing inpatient rehabilitation. J Burn Care Res 2021;42:967–74.
91. Anthonissen M, Daly D, Janssens T. Van den Kerckhove E. The effects of conservative treatments on burn scars: A systematic review. Burns 2016;42:508–18.
92. Bleasdale B, Finnegan S, Murray K, Kelly S, Percival SL. The use of silicone adhesives for scar reduction. Adv Wound Care 2015;4:422–30.
93. Saha AK, Mukhopadhyay M. A comparative clinical study on role of triamcinolone in hypertrophic scars. Indian J Plast Surg 2012;45:97–103.
94. Zhang DZ, Liu XY, Xiao WL, Xu YQ. Botulinum toxin type A injection improves early hypertrophic scar formation in children after facial burns: A randomized controlled trial. J Pediatr Surg 2022;57:1425–32.