



جزوه گام به گام بیوشیمی (جلد ۱)

تألیف دکتر محسن محمدی | دکتری تخصصی تغذیه

ویرایش ۹۷ - ۹۸

فصل ۱: آب و الکترولیت	۱
فصل ۲: ساختمان اسیدآمینه و پروتئین	۱۷
فصل ۳: ساختمان کربوهیدرات	۸۴
فصل ۴: ساختمان لیپید	۱۰۱
فصل ۵: آنزیم	۱۲۰
فصل ۶: ویتامین و مواد معدنی	۱۵۴

ساختمان کربوهیدرات

قندها فراوانترین مواد آلی موجود در طبیعت هستند، قندها کتون‌ها یا آلدئیدهای پلی‌هیدروکسید هستند و به همین علت غالباً در آب محلول هستند. فرمول کلی قندها $C_nH_{2n}O_n$ یا $C_n(H_2O)_n$ است و به همین دلیل به آن‌ها هیدرات‌کربن گویند. برخی از قندها از این فرمول تبعیت نمی‌کنند مانند قندهای الکلی. امروزه کربوهیدرات‌ها را مشتقات آلدئیدی یا کتونی الکل‌های پلی‌هیدریک می‌دانند.

تقسیم‌بندی کربوهیدرات‌ها:

- ۱) **منوساکاریدها:** در ساختمان خود فقط یک واحد قندی دارند. اگر دارای عامل آلدیدی باشند به آن‌ها آلدوز و اگر دارای عامل کتونی باشند به آن‌ها کتوز می‌گویند.
 - ۲) **دی‌ساکاریدها:** از اتصال دو واحد منوساکارید به وجود می‌آیند. مالتوز، ساکاروز و لاکتوز.
 - ۳) **الیگوساکاریدها:** در اثر هیدرولیز به ۳ تا ۱۰ واحد منوساکاریدی تجزیه می‌شوند و مهم‌ترین آن‌ها تتراساکاریدهایی مثل استاکیوز و رافینوز می‌باشد.
 - ۴) **پلی‌ساکاریدها:** در اثر هیدرولیز به بیش از ۱۰ واحد منوساکاریدی تجزیه می‌شوند.
 - ۵) **گلیکوکونژوگه‌ها:** حاصل اتصال واحدهای قندی به لیپیدها و پروتئین‌ها هستند. (همو پلی‌ساکاریدها و هتروپلی‌ساکاریدها)
- از مهم‌ترین مشتقات قندها که در طبقه‌بندی فوق قرار نمی‌گیرند، می‌توان به اسید سیالیک، اسید مورامیک، اینوزیتول، ویتامین C و برخی از آنتی‌بیوتیک‌ها مثل استرپتومایسین اشاره کرد.

منوساکاریدها:

منوساکاریدها می‌توانند آلدوز (دارای عامل آلدئیدی) یا کتوز (دارای عامل کتونی) باشند. ساده‌ترین نوع کربوهیدرات‌ها می‌باشند که در طبیعت به صورت آزاد یافت می‌شوند و معمولاً از ۳ تا ۷ کربن تشکیل شده‌اند. (آلدوزها ۳ تا ۶ کربن و کتوزها ۳ تا ۷ کربن). منوساکاریدها در آب محلول هستند و به آسانی متبلور می‌شوند و از همه مهم‌تر دارای خاصیت احیاکنندگی می‌باشند.

منوساکاریدها به دو دسته ساده و مرکب تقسیم می‌شوند:

۱. منوساکاریدهای ساده شامل:

- ۱) پنتوزها: مانند ریبوز که از عناصر ساختمانی RNA می‌باشند و نقش‌های دیگری چون نقش کوآنزیمی در بدن ایفا می‌کند؛ مانند **D-ریبولوز که در مسیر پنتوز فسفات تولید می‌شود و یا L-گزیلولوز که در مسیر اسید اورونیک تولید می‌شود. D-آرابینوز و D-گزیلولوز در سنتز گلیکوپروتئین‌ها شرکت می‌کنند.**

۲) هگزوزها: از جمله هگزوزهای معروف می‌توان از گلوکز، گالاکتوز، مانوز و فروکتوز نام برد.

۱۱. منوساکاریدهای مرکب شامل:

۱) مشتقات آمینه (قندهای آمین دار): که عامل هیدروکسیل کربن دوم آن‌ها به عامل آمین (NH_2) تبدیل شده است مانند: گلوکز آمین یا گالاکتوز آمین.

۲) مشتقاته سولفات و N استیله قندها: این مشتقات در ساختمان پروتئوگلیکان‌ها (موکوپلی ساکاریدها) وجود دارند.

۳) مشتقات فسفات: مانند: گلوکز ۶ فسفات، فروکتوز ۶ فسفات یا فروکتوز ۱ و ۶ بیس فسفات.

○ نام‌گذاری قندها بر حسب تعداد اتم کربن است ابتدا تعداد اتم کربن و پسوند اوز (ose) برای آلدئیدها و در مواردی close برای کتون‌ها ذکر می‌شود. (جدول زیر)

فرمول	تعداد کربن	آلدوزها (دارای عامل آلدیدی)	کتونی (دارای عامل کتونی)
$\text{C}_3\text{H}_6\text{O}_3$	۳ اتم کربن (تریوزها)	گلسیرآلدئید	دی هیدروکسی استون
$\text{C}_4\text{H}_8\text{O}_4$	۴ اتم کربن (تتروزها)	اریتروز	اریتروز
$\text{H}_5\text{H}_{10}\text{O}_5$	۵ اتم کربن (پنتوزها)	ریبوز- گزیلوز- آرابینوز	ریبولوز- گزیلولوز
$\text{H}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$	۶ اتم کربن (هگزوزها)	گلوکز- مانوز- گالاکتوز - تالوز- آلوز	فروکتوز- سوربوز- تاگاتوز و پسیکوز
$\text{C}_7\text{H}_{14}\text{O}_7$	۷ اتم کربن (هپتوزها)	-	سدوهیتولوز

ساختمان منوساکاریدها:

۱- خطی (فیشر): در این شکل گروه آلدیدی یا کتونی در هیچ واکنشی شرکت نمی‌کند و آزاد است.

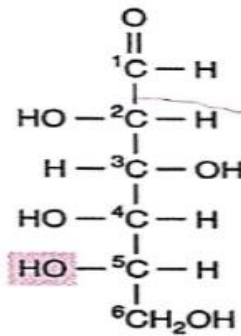
فرم خطی فیشر توانست خواص کربن نامتقارن یا کایرال را به خوبی بیان کند. این کربن نامتقارن در ایجاد ایزومر فضایی قندها حائز اهمیت است. کربن نامتقارن کربنی است که به ۴ گروه مختلف وصل شده باشد. پس وجود کربن نامتقارن در قندها باعث ایجاد ایزومر فضایی و فعالیت نوری قندها می‌شود. ایزومرهای فضایی یا تصاویر آینه‌ای یکدیگر هستند به آن‌ها آنانتیومر می‌گویند و یا دیاستومر می‌باشند.

✓ تمامی مونوساکاریدها، به غیر از دی هیدروکسی استن، دارای یک یا چند اتم کربن نامتقارن (کایرال) بوده و بنابراین به صورت اشکال ایزومری دارای فعالیت نوری می‌باشند و نورپلاریزه را در دستگاه پلاریومتر به سمت راست یا چپ می‌چرخانند.

تعداد ایزومرهای نوری: 2^n (کربن تعداد نامتقارن = n)

به طور مثال گلیسرآلدئید دارای یک کربن نامتقارن بوده پس دارای ۲ ایزومر نوری است.

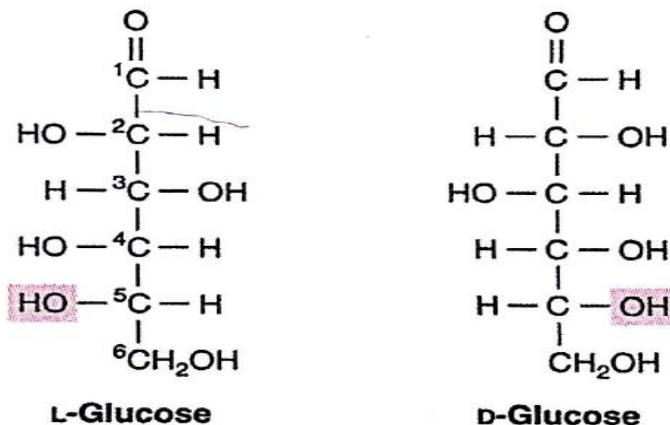
✓ آلدوهگزوزها مثل گلوکز (شکل زیر) با چهار مرکز کایرال، $2^4=16$ ایزومر فضایی دارند. کربن‌های ۲، ۳، ۴ و ۵ در گلوکز به ۴ عامل مختلف متصل می‌باشند پس نامتقارن می‌باشند. کربن‌های ۱ و ۶ نامتقارن نمی‌باشند.



نکته بسیار مهم: به طور کلی آلدوزهای خطی دارای N-2 کربن نامتقارن هستند و کتوزهای خطی N-3 (N تعداد کربن‌های قند). مثلاً گلوکز که ۶ کربن دارد دارای ۴ و فروکتوز نیز که ۶ کربن دارد ولی کتوز است دارای ۳ کربن نامتقارن است؛ بنابراین کتوزها نسبت به آلدوزهای هم کربن یک کربن نامتقارن کمتری دارند و بنابراین تعداد ایزومرهای فضایی آنها نصف آلدوزها می‌باشد. گلوکز دارای ۴ کربن نامتقارن دارای ۱۶ ایزومر فضایی و فروکتوز دارای ۸ ایزومر فضایی.

ایزومری L-D: آنانتیومتری (تصویر آینه‌ای یکدیگر).

در حالت خطی بر اساس جهت قرار گرفتن OH متصل به آخرین کربن نامتقارن آن (کربن مرجع) مشخص می‌شود. اگر OH در سمت راست باشد عضو D است و اگر در سمت چپ باشد عضو L. طبق شکل زیر:



- ✓ **نکته مهم:** دقت کنیم اگر یکی از قندها این گروه نوریلاریزه را به سمت راست بچرخاند به آن راست گردان (+) و اگر به سمت چپ بچرخاند چپ گردان (-) تلقی می‌شود؛ بنابراین ایزومری L و D را ما تعیین می‌کنیم ولی + یا - بودن فقط توسط دستگاه پلاریمتر تعیین می‌شود. یک قند D می‌تواند هم + و هم - باشد. مثلاً به D گلوکز می‌تواند راست گردان (+) باشد که به آن دکستروز گویند و یا D - باشد مثل D فروکتوز چپ گردان (-) که به آن لولوز گویند.
- ✓ اگر فرم D یک قند راست گردان یا + باشد فرم L آن چپ گردان یا - می‌باشد.

✓ چنانچه مقدار مساوی از فرم‌های L و D یک قند را باهم مخلوط کنیم مخلوط راسمیک به دست می‌آید که فاقد فعالیت نوری است.

✓ نکته: برخلاف اسیدهای آمینه که در طبیعت به فرم L هستند قندها عمدتاً به فرم D هستند. به جز قندهای L- آرابینوز، L-

فوکوز و L- رامنوز

ایزومر اپیمری: اگر دو قند از هر نقطه مشابه یکدیگر باشد (آلدوز، کتوز، D یا L بودن) و تنها تفاوت هر قند در نحوه قرار گرفتن یک

OH حول یک کربن کایرال باشد آن دو قند را نسبت به یکدیگر اپیمر نامند. در حقیقت دیاستومرهایی که فقط در جهت گروه OH

یک کربن نامتقارن یا هم اختلاف دارند اپیمر نامیده می‌شود.

ایزومری عامل: اگر تفاوت دو قند تنها در گروه عاملی (گروه آلدئید یا کتون) باشد آن دو قند را ایزومر عامل می‌نامند. مثال: گلولز و فروکتوز ایزومر عامل یکدیگر هستند.

مثال: مانوز اپی مری ۲ گلوکز است یعنی در کربن شماره ۲ در جهت قرار گرفتن OH تفاوت دارند. گالاکتوز اپیمری ۴ گلوکز است. ایدوز

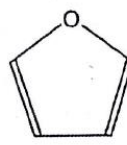
اپیمر ۵ گلوکز است، آلتروز اپیمر ۲ آلوکز است، آرابینوز اپی مری ۲ ریبوز است، گزیلوز اپیمر ۳ ریبوز است.

۲- شکل حلقوی (هاورث) قندها:

با توجه به اینکه فرم خطی قندها قادر به توصیف همه ویژگی‌های قندها نبود تولنس فرم حلقوی قندها را پیشنهاد داد. قندها در حالت حلقوی به دو شکل ۵ ضلعی یا فورانوز (به دلیل شباهت با حلقه فوران) و یا ۶ ضلعی به اسم پیرانوز (به دلیل شباهت با حلقه پیران) دیده می‌شوند. در حقیقت در محیط آبی آلدوتریوزها و تمامی مونوساکاریدهای دارای بیش از چهار اتم کربن غالباً به شکل ساختمان‌های حلقوی هستند. برای اینکه قند از حالت خطی به فرم حلقوی تبدیل شود باید کربن آلدئیدی شماره ۱ در آلدوزها با هیدروکسیل کربن‌های ۴ (تشکیل فورانوز) و ۵ (تشکیل پیرانوز) و در کتوزها کربن کتون شماره ۲ با کربن‌های ۵ (تشکیل فورانوز) و ۶ (تشکیل پیرانوز) وارد واکنش شود. اتصال کربن آلدئیدی در آلدوزها با کربن‌های ۵ و ۶ باعث ایجاد تشکیل فرم حلقوی قند به نام همی استال (نیمه استال) و ارتباط کربن کتون باعث ایجاد همی کتال خواهد شد. پس تشکیل ساختمان‌های حلقوی به‌واسطه واکنش عمومی بین آلدئیدها یا کتونها و ایجاد مشتقاتی بنام نیمه استال یا نیمه کتال می‌باشد. به طور خلاصه اشکال فورانوزی و پیرانوزی آلدوزها از اتصال کربن آنومری (کربن ۱) به ترتیب با کربن ۴ و ۵ ایجاد می‌گردند و اشکال فورانوزی و پیرانوزی کتوزها (مانند فروکتوز) حاصل اتصال کربن آنومری (کربن ۲) به ترتیب با کربن ۵ و ۶ می‌باشد.

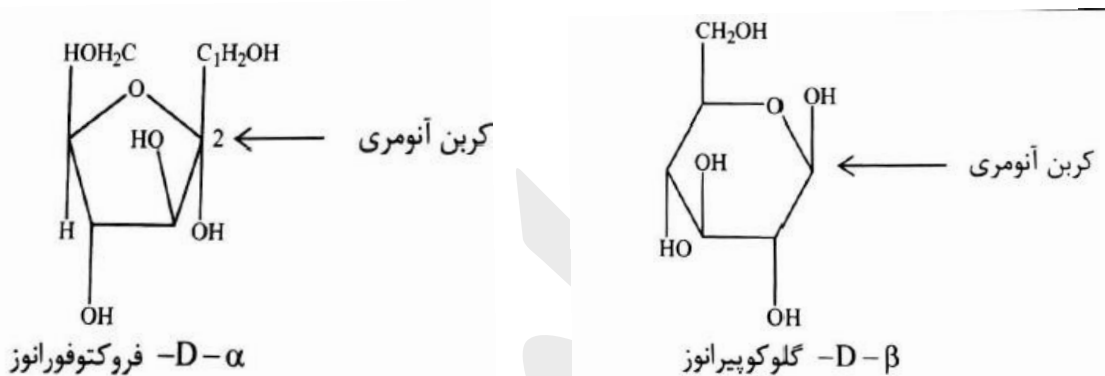


Pyran



Furan

- ✓ **نکته بسیار مهم:** کربن شمار ۱ در آلدوزها و ۲ در کتوزها در حالت خطی نامتقارن نبود ولی چون یک پیوند برقرار می‌کند تا فرم حلقوی تشکیل شود حالا تبدیل به نامتقارن می‌شود. به این کربن در حالت حلقوی که نامتقارن شده است کربن آنومری می‌گویند که تولید دو ایزومر فضایی به نامهای آلفا (α) و بتا (β) می‌کنند که به آن ایزومر آنومری می‌گویند. طبق شکل زیر:
- ✓ اگر OH متصل به کربن آنومری و شاخه جانبی (CH_2OH) همسو باشند به آن سیس یا β گویند.
- ✓ اگر OH متصل به کربن آنومری و شاخه جانبی همسو نباشند (ترانس) یا α گویند.



- ✓ به تعبیری دیگر اشکال ایزومری مونوساکاریدهایی که تنها از نظر کونفیگوراسیون حول کربن نیمه استال یا نیمه کتال با یکدیگر اختلاف دارند را آنومر گویند. در محلولهای آبی آنومرهای α و β از طریق فرایندی بنام موتاروتاسیون قابل تبدیل به یکدیگر هستند. مخلوط حاصل معمولاً حاوی یک سوم آلفا و دو سوم بتا می‌باشد؛ یعنی حدود ۶۲ درصد بتا دی گلوکوپیرانوز و ۳۸ درصد آلفا دی گلوکوپیرانوز.

- ✓ حلقه ۶ اتمی آلدوپیرانوز پایدارتر از حلقه آلدوفورانوز می‌باشد و در محلولهای آلدوهگروز، غالب می‌باشد. تنها آلدوزهای دارای حداقل ۵ کربن می‌توانند ایحاد حلقه پیرانوز نمایند. هگروزها بیشتر به شکل پیرانوز و پنتوزها به صورت فورانوز دیده می‌شوند.

نکته: با حلقوی شدن قند، یکی به کربن‌های کایرال اضافه می‌شود و ایزومرهای نوری دو برابر می‌شود.

به طور کلی طریقه محاسبه تعداد کربن‌های کایرال در انواع خطی و حلقوی به شکل زیر است.

مونوساکارید	خطی	حلقوی
آلدوز	n-2	n-1
کتوز	n-3	n-2

- ✓ در حالت حلقوی برای تعیین فرم‌های L و D به جهت گروه جانبی CH_2OH نگاه می‌کنیم به طوری که اگر بالا باشد D و اگر پایین باشد L می‌نامیم.

نکته بسیار مهم: گفته می‌شود که همه مونوساکاریدها در حالت خطی و فرم فیشر احیاء کننده اند یعنی می‌توانند با محلول‌های قلیایی مس دار بندیکت و فهلینگ و نیز عوامل اکسید کننده خفیف نظیر یون فریک ترکیب شده و تولید رسوب قرمز رنگ کنند ولی در حالت حلقوی احیاء کننده نیستند. با این وجود چرا گفته می‌شود که گلوکز در حالت حلقوی احیاء کننده می‌باشد؟؟

جواب این سوال را باید در فرایند **موتوروتاسیون** پیدا کرد. در حقیقت همانطور که گفته شد در این فرآیند فرم‌های الفا و بتا بهم تبدیل می‌شوند؛ یعنی اگر گلوکز را در آب حل کنیم مشاهده می‌شود که میزان چرخش نوری محلول دچار نوسان می‌شود که علت این نوسان همان تبدیل شدن فرم‌های الفا و بتا بهم دیگر می‌باشد. لازمی این تبدیل باز شدن حلقه‌ی همی استال و ایجاد فرم فیشر (خطی) و شکل گیری مجدد فرم حلقوی همی استال است. پس در لحظه ای که قند خطی می‌شود می‌تواند از خود خاصیت احیاء کنندگی نشان دهد. پس دلیل احیاء کننده قندهای حلقوی همین فرآیند موتوروتاسیون است تا قند بتواند فرم خطی را ایجاد کند و اگر خطی نمیشد به هیچ وجه احیاء کننده نبود. از طرفی تنها قندهایی می‌توانند **موتوروتاسیون** داشته باشند که **کربن آنومری آزاد داشته باشند (برای تشکیل آلفا و بتا)**. خلاصه اینکه: **اگر قندی دارای کربن آنومر آزاد باشد دارای خاصیت موتوروتاسیون بوده و احیاء کننده است. تمام مونوساکاریدها احیاء کننده هستند. از طرفی دی ساکاریدهایی که دارای کربن آنومری آزاد باشند احیاء کننده اند و خواص موتوروتاسیون دارند.**

خواص فیزیکوشیمیایی قندها:

خواص شیمیایی قندها مربوط به عامل الکلی و کربوئیل (آلدئید و کتون) آن‌ها است.

۱) اکسیداسیون قندها:

آلدونیک اسید: تحت شرایط ملایم- اکسید شدن عامل آلدئیدی (مثلاً در حضور آب برم) - مثال: اسید گلوکونیک (تبدیل گروه آلدئیدی به گروه کربوکسیل)

الکی شماره ۶ (تبدیل گروه الکی به گروه کربوکسیل): مثال: **اسید گلوکورونیک** (که در سم زدایی داروها، افزایش حلالیت هورمون‌های استروئیدی و بیلی روبین جهت دفع از بدن و شرکت در ساختار پروتئوگلیکان‌ها). یا گالاکتورونیک اسید که در تشکیل فیبر

پکتین شرکت می‌کند. فرایند اورونیک به شکل آنزیماتیک در بدن در چرخه اسید اورونیک انجام می‌شود.

نکته مهم: شکل دیگری از قندهای اورونیک اسید، **ابدورونیک اسید** است که **ایمر ۵ گلوکورونیک اسید** که این هم در ساختار پروتئوگلیکان‌ها شرکت می‌کند.

آلداریک اسیدها: اکسید شدن هردو عامل آلدئیدی و عامل الکی (کربن شماره ۱ و ۶) در حضور اکسید کننده گرم و غلیظ HNO_3 که هردو عامل آلدئیدی و الکی به گروه کربوکسیل تبدیل می‌شوند (کربوکسیلیک اسیدها).

مثال:

آلداریک اسید گلوکز: گلوکاریک اسید یا اسید ساخاریک

آلداریک اسید گالاکتوز: گالاکتاریک اسید یا اسید موسیک

✓ هر دو اسید آلدونیک و اورونیک ایجاد استرهای پایداری بنام لاکتون می‌کنند.

(۲) احیاء شدن قندها

✓ احیاء عامل آلدیدی در کربن شماره ۱ که باعث تولید قندهای الکلی می‌شود. مثل تبدیل گلوکز و فروکتوز به سوربیتول و تبدیل گالاکتوز به گالاکتیتول (دولسیتول) و ریبوز به ریبیتول و مانوز به مانیتول.

نکته: در بیماری گالاکتوزومی در عدسی چشم گالاکتوز به گالاکتیتول تبدیل و به علت جذب آب و تغییر در فشار اسمزی باعث ایجاد آب مروارید یا کاتاراکت می‌شود.

✓ احیاء عامل الکلی کربن شماره ۶ که باعث تولید قندهای داکسی می‌شود. مثل تبدیل گالاکتوز به ۶ داکسی ال گالاکتوز (L فوکوز) و تبدیل مانوز به ۶ داکسی مانوز (L-رامنوز) و تبدیل ریبوز به ۲-داکسی ریبوز (معمول ترین واکنش برای تشکیل DNA).

نکته: در احیاء عامل الکلی CH₂OH در حقیقت یک هیدروژن جایگزین عامل الکلی می‌شود (داکسی) که تبدیل به CH₃ یا متیل می‌شود لذا به ال فوکوز متیل پنتوز هم می‌گویند. ال فوکوز قندی در ساختار گلیکوپروتئین‌ها و گلیکولیپیدها (آنتی ژن‌های گروه خونی) است.

(۳) واکنش قندها با اسیدهای غلیظ نظیر H₂SO₄

✓ در این حالت از مونوساکاریدهای ۵ کربنه تولید ترکیبات حلقوی به نام فورفورال و از ۶ کربنه تولید هیدروکسی متیل فورفورال می‌شود

(۴) واکنش قندها با محلول‌های قلیایی

✓ محلول‌های قلیایی رقیق باعث توتومریزه شدن قندها و در نتیجه تبدیل آن‌ها به هم می‌شود. مثلاً گلوکز، مانوز و فروکتوز در نتیجه توتومریزه شدن به حد واسط‌های اندیول تبدیل می‌شوند.

(۵) واکنش با فنیل هیدرازین

✓ تولید ترکیبات کریستالی می‌شود که نقطه ذوب آن‌ها برای تشخیص نوع مونوساکارید استفاده می‌شود

سایر مشتقات مونوساکاریدها

- ✓ شکل فسفات قندها که در سلول حبس و توانایی خروج از سلول را ندارد مثل گلوکز ۶ فسفات
- ✓ قندهای آمینه که معمولاً گروه آمین جایگزین هیدروکسیل کربن ۲ می‌شود مثل گلوکز آمین. در بیشتر مواقع استات به آن متصل می‌شود و تشکیل قندهای استیله می‌کند. مثل N-استیل گلوکز آمین. دهنده آمین در این فرمها گلوتامین است.

قندهای اسیدی:

- ✓ مثل اسید سیالیک (N-استیل نورامینیک اسید یا NANA) که قندی داکسی و اسیدی است و در ساختار گلیکوپروتئینها و گلیکولیپیدها مثل گانگلیوزیدها دیده می‌شود. از ترکیب N-استیل مانوز آمین و اسید پیروویک ساخته شده است. اسید سیالیک در PH فیزیولوژیک دارای بار منفی است.

نکته مهم: قندهای ال فوکوز، ال راموز و اسید سیالیک جزوهای داکسی هستند.

- ✓ اسید مورامیک: از اتصال گلوکز آمین به لاکتات حاصل می‌شود. به شکل N-استیل مورامیک اسید در دیواره‌ی پپتیدوگلیکان‌های باکتری وجود دارد؛ که در آن لاکتیک اسید با پیوند اتری بتا ۱ به ۴ به N-استیل گلوکز آمین متصل شده است. لیزوزیم پیوند پیوند بتا ۱ و ۴ بین این دو ترکیب را شکسته و باعث مرگ باکتری می‌شود
- اسید آسکوربیک (ویتامین C): قند ۶ کربنه ای است که از گلوکز یا L سوربوز تهیه می‌شود که در بیوسنتز بافت کلاژن، متابولیسم تیروزین، جذب آن و... نقش دارد.

دی ساکاریدها:

دی ساکاریدهایی (نظیر مالتوز، لاکتوز و سوکروز) از دو مونوساکارید تشکیل شده‌اند که توسط یک پیوند O-گلیکوزیدی بطور کووالان به یکدیگر متصل هستند، این پیوند زمانی تشکیل می‌شود که گروه هیدروکسیل یک مونوساکارید با OH کربن آنومری قند دیگر واکنش دهد. این واکنش همراه با تولید یک استال یا کتال می‌باشد. همانطور که گفته شد ساختمان حلقوی یک آلدوز (مونوساکارید) را همی استال (نیمه استال) گویند، زیرا از ترکیب یک الکل و آلدهید به وجود می‌آید حالا برای تشکیل دی ساکاریدها این همی استال باید با الکل مونوساکارید دیگر ترکیب شود که حاصل آن این استال و کتال می‌باشد و به پیوند حاصل گلیکوزیدی می‌گویند و به دی ساکاریدها گلیکوزید می‌گویند.

- ✓ به طور کلی پیوند گلیکوزیدی بین OH کربن آنومر یک مونوساکارید با ماده دیگر تشکیل می‌شود که ماده دوم می‌تواند قند یا غیر قند باشد. اگر ترکیب دومی هم مونوساکارید باشد که می‌تواند تشکیل دی ساکارید بدهد و چون در هر دو طرف گروه OH وارد واکنش شده به آن پیوند O-گلیکوزیدی می‌گویند. اگر ترکیب دوم قند نباشد به آن آگلیکون می‌گویند. اگر از ترکیب دوم گروه نیتروژنی وارد واکنش شود مثلاً در باز آدنین و یا آمین اسید آمینه آسیارژین که دارای گروه ازت N می‌باشد به پیوند

حاصل N گلیکوزیدی می‌گویند. پس می‌توان گفت که دی ساکاریدها گلیکوزیدهایی هستند که از اتصال O-گلیکوزیدی دو واحد مونوساکارید حاصل شده‌اند.

✓ گلیکوزیدهای قلبی مثل داروهای دیژیتالیس و استروفانتوس مثل آوآبائین که مهار کننده پمپ سدیم پتاسیم ATPase می‌باشد همگی آگلیکون می‌باشند و یا برخی از آنتی بیوتیک‌های گلیکوزیدی مثل استرپتومایسین، اریترومایسین و کانامایسین

✓ نکته مهم: پیوند O-گلیکوزیدی نوعی پیوند اتری است زیرا در پیوند اتری نیز دو گروه OH وارد واکنش می‌شود. لذا چون در قندها صحبت می‌کنیم به جای اتری گلیکوزیدی گفته می‌شود.

✓ پیوندهای گلیکوزیدی با آزاد شدن آب همراه است.

✓ **نکته مهم: در دی ساکاریدها ساکاروز و تrehalose تشکیل پیوند بین دو مونوساکارید به نحوی است که هر دو کربن آنومری در پیوند شرکت می‌کنند و به عبارتی فاقد کربن آنومری آزاد هستند پس فاقد موتورتاسیون بوده و احیاء کننده نیستند. بقیه دی ساکاریدها مثل لاکتوز، مالتوز دارای کربن آنومری آزاد می‌باشند.**

✓ هیدرولیز سوکروز مخلوطی از گلوکز و فروکتوز به نام قند معکوس (Invert sugar) حاصل می‌شود. این مخلوط خلاف ساکارز که راست گردان است، نور پلاریزه را به چپ منحرف می‌کند. آنزیم دخیل در این تجزیه سوکراز یا اینورتاز می‌باشد.

✓ تrehalose دی ساکاریدی است که در قارچها و مخمرها وجود دارد و قند اصلی همولف حشرات می‌باشد.

✓ قند لاکتوز در بارداری در ادرار دیده می‌شود.

دی ساکاریدهای مهم:

نام دی ساکارید	ترکیب مونوساکاریدی	اتصال
مالتوز	α - گلوکز + α - گلوکز	$\alpha 1 \rightarrow 4$
ایزومالتوز	α - گلوکز + α - گلوکز	$\alpha 1 \rightarrow 6$
لاکتوز	β - گلوکز + β - گالاکتوز	$\beta 1 \rightarrow 4$
سلوبیوز	β - گلوکز + β - گلوکز	$\beta 1 \rightarrow 4$
جنتی بیوز	β - گلوکز + β - گلوکز	$\beta 1 \rightarrow 6$
ساکارز	α - گلوکز + β - فروکتوز	$\alpha 1 \rightarrow 2$
ترهالوز	α - گلوکز + α - گلوکز	$\alpha 1 \rightarrow 1$

پلی ساکاریدها:

مولکولهای درشتی هستند که از تعداد زیادی قند که ممکن است تا چند هزار واحد نیز برسد تشکیل شده‌اند و به دو گروه هوموپلی ساکارید و هترو پلی ساکارید تقسیم می‌شوند.

- (۱) **هومو پلی ساکاریدها:** پلیمری از یک نوع قند ساده هستند که نقش ذخیره ای و ساختمانی ایفا می کنند.
- (۲) **هترو پلی ساکاریدها:** پلیمری از دو نوع مشتق قندی می باشد که به آن ها گلیکوز آمینو گلیکان یا موکوپلی ساکارید نیز گویند.

برخی ساکاریدهای تشکیل شده از واحدهای غیر گلوکزی:

- (۱) اینولین: پلیمری از فروکتوز
- (۲) آگار: پلیمری از گالاکتوز سولفات
- (۳) پکتین: پلیمری از اسید گالاکتورونیک (اسید پکتیک)
- (۴) اسید آلژینیک: پلیمری از اسید مانورونیک

پلی ساکاریدها:

(۱) هوموپلی ساکاریدها

- **ذخیره ای:** گلیکوژن، نشاسته، اینولین و دکسترین
- **ساختمانی:**
 - (۱) سلولز
 - (۲) کیتین
- **نشاسته:**
 - ✓ پلی ساکارید ذخیره ای در سلول گیاهی است.
 - ✓ از واحدهایی بنام آمیلوز و آمیلوپکتین تشکیل شده است.
 - ✓ آمیلوز نوع بدون شاخه (خطی) نشاسته است و از ریشه های گلوکز با اتصال $4 \rightarrow \alpha 1$ تشکیل شده است.
 - ✓ آمیلوپکتین ۸۰-۸۵ درصد نشاسته را تشکیل می دهد که قسمت شاخه دار نشاسته است که هر شاخه ۲۴ تا ۳۰ گلوکز دارد. اتصالات $4 \rightarrow \beta 1$ موجب ایجاد شاخه در آن می شود.
 - ✓ از هیدرولیز ناقص نشاسته دکسترین، مالتوز و ایزومالتوز تولید می شود.
 - ✓ نکته: آنزیم آلفا آمیلاز بزاقی و پانکراسی فقط قادر به تجزیه اتصالات $4 \rightarrow \alpha 1$ می باشد. چون آلفا آمیلاز قادر به شکستن پیوندهای شاخه دار نیست لذا اثر آن دکسترین حاصل می شود. برای تجزیه پیوندهای بتا ۱ و ۶ نیاز به آنزیم شاخه شکن یعنی آلفا ۱ و ۶ گلوکوزیداز وجود دارد.
- **گلیکوژن:**
 - ✓ یک پلی ساکارید ذخیره ای در حیوانات می باشد.
 - ✓ در کبد فراوان است و تا ۷ درصد وزن خالص کبد را تشکیل می دهد.
 - ✓ حاوی زنجیره هایی با ۱۲-۱۴ واحد آلفا D- گلوکوپیرانوز می باشد به صورتی که پیوندهای گلیکوزیدی $4 \rightarrow \alpha 1$ پشت سر هم قرار گرفته و توسط پیوندهای گلیکوزیدی $6 \rightarrow \alpha 1$ منشعب شده است.

- ✓ ساختمان شبیه آمیلویکتین دارد. اگرچه تعداد شاخه‌ها در گلیکوژن بیشتر است ولی طول شاخه‌ها در گلیکوژن کمتر است. (۱۲ تا ۱۴ واحد در گلیکوژن و ۲۰ تا ۳۰ واحد در آمیلویکتین).
- ✓ از آنجایی که شاخه گلیکوژن به یک قند غیر احیا کننده (قند فاقد کربن آنومری آزاد) ختم میگردد، ملکول گلیکوژن به تعداد شاخه‌های خود دارای انتهای غیر احیاکننده بوده ولی تنها یک انتهای احیا کننده دارد. (توضیح در متابولیسم گلیکوژن).

- **اینولین:**

- ✓ همو پلی ساکارید ذخیره ای از واحدهای D بتا فروکتوفورانوز (یک فروکتوزان) می باشد.
- ✓ بدون شاخه است.
- ✓ با ید رنگ نمیگیرد.
- ✓ در آب گرم حل می شود.
- ✓ برای تعیین میزان فیلتراسیون گلومرولی (GFR) مفید می باشد.

- **سلولز:**

- ✓ یک هومو پلی ساکارید خطی و غیر منشعب از واحدهای بتا D گلوکز است.
- ✓ دارای پیوند β می باشد (4 \rightarrow 1 β). (آمیلوز، آمیلویکتین و گلیکوژن که دارای پیوندهای آلفا هستند).
- ✓ اکثر حیوانات به دلیل نداشتن آنزیم برای هیدرولیز اتصالات 4 \rightarrow 1 β نمیتوانند از سلولز به عنوان ماده سوختی استفاده نمایند.

- **کیتین:**

- ✓ یک هومو پلی ساکارید خطی متشکل از واحدهای N-استیل گلوکز آمین با پیوندهای β می باشد.
- ✓ اجزای اصلی اسکلت سخت خارجی بندپایان است.
- ✓ تفاوت شیمیایی کیتین با سلولز در ایتخلاف گروه هیدروکسیل کربن ۲ با یک گروه آمینواستیل می باشد.
- ✓ کیتین ایجاد فیبرهای امتداد یافته ای نظیر سلولز نموده و همانند سلولز توسط حیوانات مهره دار قابل هضم نمی باشد.
- ✓ کیتین بعد از سلولز دومین پلی ساکارید فراوان در طبیعت می باشد.

هتروپلی ساکاریدها

با هیدرولیز این دسته از پلی ساکاریدها بیش از یک نوع مونوساکارید به وجود می آید و در ساختارشان علاوه بر قندها استات‌ها و سولفات‌ها نیز یافت می شود؛ که مهم ترین این هتروپلی ساکاریدها گلیکوز آمینوگلیکان‌ها (GAG) می باشند که به آن‌ها موکوپلی ساکاریدها نیز می گویند؛ که از اجزای اصلی بافت‌های همبند بوده و در ساختار غضروف و استخوان نیز وجود دارند. (جدول).

GAGها از واحدهای تکراری دی ساکاریدهای قندهای آمینه (عمدتاً N-استیل گلوکز آمین و N-استیل گالاکتوز آمین) و اسیدهای اورونیک (عمدتاً اسید گلوکورونیک و بعضاً ایدورونیک اسید) تشکیل شده اند. مختص جانوران و باکتری‌ها هستند و در گیاهان وجود ندارند. این ترکیبات پلی آنیون (واجد بار منفی) اجزاء ماتریکس خارج سلولی هستند که وزن مولکولی بالایی داشته و به

عنوان روان کننده در مفصل ها و... دیده می‌شوند. در بعضی از گلوکز آمینو گلیکآن‌ها، یک یا چند گروه هیدروکسیل قند آمینو با سولفات استریفیه شده است. ترکیب گروه‌های سولفات با گروه‌های کربوکسیلات ریشه‌های اسید اورونیک در گلیکوز آمینوگلیکآن‌ها، چگالی بسیار بالایی از بارهای منفی ایجاد می‌نماید.

اگر این ترکیبات GAG با پروتئین‌ها اتصال برقرار کنند به ترکیب حاصل پروتئوگلیکان می‌گویند که در ادامه راجع به آن‌ها صحبت خواهد شد.

انواع موکولی ساکاریدها	واحد ساختمانی	محل استقرار
اسید هیالورونیک	بتا-د-اسید گلوکورونیک (۱→۳) بتا-د-N-استیل گلوکز آمین	پوست، بند ناف
کندروایتین ۴ - سولفات	بتا-د-اسید گلوکورونیک (۱→۳) بتا-د-N-استیل گلاکتوز آمین ۴ سولفات	غضروف، استخوان، پوست
کندروایتین ۶ - سولفات	فقط به جای کربن ۴ در کربن ۶ سولفات قرار دارد.	غضروف، پوست
هپارین	اسید آلفا-ال-ایدورونیک (۱→۴) آلفا-د-N-گلوکز آمین ۲ و ۶ دی سولفات	ریه، طحال، کبد، ماهیچه
هپارین سولفات	اسید آلفا-ال-ایدورونیک (۱→۳) بتا-N-سولفات گلوکز آمین ۴ سولفات	پوست، ریه
کراتان سولفات	بتا-د-گلاکتوز (۱→۴) بتا-د-N-استیل گلوکز آمین ۶ سولفات	غضروف، قرنیه
درماتان سولفات (کندروایتین سولفات B یا بتا-هپارین)	اسید آلفا-ال-ایدورونیک (۱→۳) بتا-د-N-استیل گلاکتوز آمین ۴ سولفات	پوست، ریه

انواع گلیکوز آمینوگلیکآن‌ها

اسید هیالورونیک (هیالورونات در PH فیزیولوژیک) حاوی ریشه‌های یک در میان **D-گلوکورونیک اسید و N-استیل گلوکز آمین** می‌باشد. وزن مولکولی بسیار زیادی دارد. محلولهای شفاف شدیدا چسبنده ایجاد می‌کند که به عنوان مواد نرم کننده در مایع سینویال مفاصل عمل نموده و یک ثبات ژل مانند به مایع عدسی چشم مهره داران می‌دهد. (کلمه یونانی hyalos به معنی شیشه می‌باشد، هیالورونات میتواند یک ظاهر شیشه ای یا نیمه شفاف داشته باشد).

✓ هیالورونات همچنین یک جز ضروری ماتریکس خارج سلولی غضروف و تاندونها می‌باشد که به خاطر واکنش‌های متقابل قوی با سایر اجزا ماتریکس به قدرت کششی و الاستیسیته بافت کمک می‌کند. **هیالورونیداز** که توسط بعضی باکتریهای بیماریزا تولید میگردد، میتواند اتصالات گلیکوزیدی هیالورونات را هیدرولیز کند و بافت را به تهاجم باکتریایی حساس تر کند. در بسیاری از موجودات، آنزیم مشابهی در اسپرم سس هیدرولیز پوشش گلیکوز آمینوگلیکآن خارجی اطراف تخمک شده که امکان نفوذ اسپرم را فراهم می‌کند.

✓ **گلیکوز آمینوگلیکآن‌های دیگر دو تفاوت با هیالورونات دارند، یکی اینکه عموماً پلیمرهای بسیار کوتاهتری هستند و دوم اینکه بطور کوالان به پروتئین‌های اختصاصی اتصال یافته اند. (اتصال هیالورونیک اسید کوالان نیست).**

✓ کندروایتین سولفات (کلمه یونانی chondros به معنی غضروف) در ایجاد قدرت کششی غضروف، تاندونها، لیگامان‌ها و دیواره‌های آئورت نقش دارد. مشابه هیالورونیک اسید است فقط به جای N-استیل گلوکز آمین حاوی N-استیل گالاکتوز آمین است.

✓ درماتان سولفات در انعطاف پذیری پوست نقش داشته و عروق خونی و دریچه‌های قلبی نیز یافت می‌شود. مشابه کندرویتین است با این تفاوت که به جای گلوکورونیک اسید حاوی ایدورونیک اسید است. (ایدورونیک اسید از گلوکورونیک اسید توسط آنزیم ۵ اپیمراز ایجاد می‌شود).

✓ کراتان سولفات (keras به معنی شاخ) فاقد اسید اورونیک بوده و محتوای سولفات آن‌ها متفاوت است. این گلوکز آمینوگلیکان‌ها در قرنیه، غضروف، استخوان و انواعی از ساختمانی‌های شاخی سلول‌های مرده، نظیر شاخ، مو، شُم، ناخن و پنجه‌ها وجود دارد.

✓ هیپارین (hepar به معنی کبد) یک ضد انعقاد طبیعی است که در ماست سل‌ها ساخته شده و به داخل خون آزاد و در آنجا با اتصال به پروتئین ضد انعقادی آنتی ترومبین ۳، آن را فعال و مانع انعقاد می‌گردد. این واکنش شدیداً الکتروستاتیک می‌باشد، هیپارین در میان تمامی ماکرومولکول‌های شناخته شده، دارای بیشترین چگالی بار منفی است (اسیدی ترین). برای جلوگیری از انعقاد نمونه خون گرفته شده برای آزمایشات بالینی و یا انتقال خون، معمولاً هیپارین اضافه می‌گردد. هیپارین به عنوان شفاف کننده (Clearing factor) باعث فعال شدن آنزیم لیپوپروتئین لیپاز می‌شود.

✓ هیپاران سولفات از نظر ساختمانی مشابه هیپارین بوده ولی دارای تراکم کمتر استرهای سولفات است و مقدار استات آن بالاتر است. هیپاران سولفات یک ترکیب خارج سلولی و هیپارین داخل سلولی است.

✓ نکته: دو ترکیب هیپارین و درماتان سولفات دارای ایدورونیک اسید می‌باشند.

گفتیم که GAG زنجیره‌های قند هستند که خود می‌توانند به پروتئین‌ها متصل شوند و تولید پروتئوگلیکان‌ها کنند. به طور کلی از اتصال قندها به پروتئین‌ها دو نوع ترکیب بسیار مهم ایجاد می‌شود که به طور مفصل به آن‌ها خواهیم پرداخت.

۱- گلیکوپروتئین‌ها ۲- پروتئوگلیکان‌ها

گلیکوپروتئین‌ها

✓ گلیکوپروتئین‌ها، گونژوگه‌های غنی از اطلاعات حاوی اولیگوساکاریدها (مثل اسید سیالیک) می‌باشند. به طوری که قسمت اعظم آن را پروتئین تشکیل می‌دهد. بخش کربوهیدراتی حاوی اطلاعات مورد نیاز برای فعالیت و متابولیسم آن‌هاست؛ و انواع گلیکوپروتئین‌ها بر اساس نحوه اتصال قند و زنجیره‌های پلی پپتیدی شامل:

(۱) **N-linked**: که در آن‌ها N استیل گلوکز آمین با نیتروژن آمین آسپارژین، پیوند N گلیکوزیدی می‌دهد. البته نکته قابل ذکر این است که در توالی Asn-X-Thr / Asn-X-Ser هر اسید آمینه ای به جای X میتواند قرار بگیرد به جز Pro, Asp و Glu. باید بدانیم که N گلیکوزیلاسیون در شبکه آندوپلاسمی خشن صورت می‌گیرد و فرایندی حین ترجمه است و نیاز به دولیکول

دارد. **فرآیند N گلیکوزیلاسیون** توسط آنتی بیوتیک **تونیکامایسین** مهار می‌شود. این آنتی بیوتیک از اضافه شدن N استیل گلوکز آمین به دولیکول فسفات جلوگیری می‌کند.

(۲) O-linked: در آن N استیل گالاکتوز آمین با هیدروکسیل ریشه سرین یا ترئونین پیوند O-گلیکوزیدی می‌دهد. **O-گلیکوزیلاسیون در دستگاه گلژی صورت می‌گیرد و فرایندی پس از ترجمه است.** نیازی به دولیکول ندارد و توسط بنزوئیل-N استیل گالاکتوز مهار می‌شود.

کلاژن نوعی گلیکوپروتئین است که در آن **O-گلیکوزیلاسیون** رخ می‌دهد ولی از طریق **گالاکتوز به هیدروکسی لیزین** در بخش پروتئینی متصل می‌شود.

جدول بسیار مهم: قندهای موجود در گلیکوپروتئین‌ها

مانوز و گالاکتوز (فراوان‌ترین قندها در گلیکوپروتئین‌ها) نکته: N گلیکوزیدی غنی از مانوز می‌باشد	هگزوزها
N استیل گلوکز آمین و N استیل گالاکتوز آمین	قندهای آمینه
آرابینوز و گزیلوز	پنتوزها
L- فوکوز	متیل پنتوز
اسید سیالیک (N استیل نورامینیک اسید)	زنجیره‌های الیگوساکاریدی

❖ **فرم فعال قندها در سنتز گلیکوپروتئین‌ها به شکل زیر می‌باشد:**

a. قندهایی که در اتصال به **UDP** فعال می‌شوند: **گلوکز، کالاکتوز، زایلوز**

b. قندهایی که در اتصال به **GDP** فعال می‌شوند: **مانوز، فوکوز**

c. **قندهایی که در اتصال به CMP فعال می‌شوند: اسید سیالیک**

موسین‌ها گلیکوپروتئین‌های غشایی یا ترشحاتی هستند که **حاوی مقادیر زیادی از زنجیره‌های اولیگوساکاریدی با اتصال O-گلیکوزیدی** هستند. موسین‌ها در بسیاری از ترشحات یافت می‌شوند و باعث لغزندگی موکوس می‌شوند. **فیبریلین** یکی از دیگر از گلیکوپروتئین‌هاست که به همراه الاستین در دیواره عروق و گومرول‌ها وجود دارد و **سیستئین بالایی** دارد. نقص در تولید در آن باعث ایجاد **سندروم مارفان** می‌شود. **لامینین** دیگر ترکیب گلیکوپروتئینی در **غشاء پایه گومرول**ها یافت می‌شود. **فیرونکتین** دیگر گلیکوپروتئین اصلی ماتریکس خارج سلولی است که در **چسبندگی و مهاجرت سلولی** نقش دارد.

یکی از شناخته شده ترین گلیکوپروتئین‌های غشایی، گلیکوفورین A غشاء گلبولهای قرمز می‌باشد. ۶۰ درصد این گلیکوپروتئین را کربوهیدرات، **به شکل ۱۶ زنجیر اولیگوساکاریدی** (در کل شامل ۶۰ تا ۷۰ ریشه کربوهیدرات) تشکیل می‌دهد که به طور کوالان به

ریشه‌های اسید آمینه موجود در نزدیکی انتهای آمینوزنجیر پلی پپتیدی اتصال یافته اند. از میان این زنجیره‌های اولیگوساکاریدی، ۱۵ زنجیر از طریق اتصال O گلیکوزیدی به ریشه‌های ser و Thr و یکی از طریق اتصال N به یک ریشه Asn اتصال دارد.

بسیاری از پروتئین‌هایی که توسط سلول‌های یوکاریوتی ترشح می‌گردند، از جمله اکثر پروتئین‌های خونی، گلیکوپروتئینی هستند. برای مثال، ایمنوگلوبولین‌ها (آنتی بادی‌ها) و بعضی از هورمون‌ها، نظیر هورمون محرک فولیکولی، هورمون تولید کننده جسم زرد و هورمون محرک تیروئید، ساختمان گلیکوپروتئینی دارند. بسیاری از پروتئین‌های شیر، نظیر آلبومین شیر، بعضی از پروتئین‌های ترشی توسط پانکراس (مثل ریونوکلئاز)، همانند اکثر پروتئین‌های موجود در لیزوزوم، حاوی کربوهیدرات می‌باشند.

ریشه‌های اسید سیالیک (Neu5Ac) موجود در انتهای زنجیره‌های اولیگوساکاریدی بسیاری از گلیکوپروتئین‌های پلاسمایی، پروتئین را در برابر برداشت و تخریب کبدی حفاظت می‌نماید. برای مثال، سرولوپلاسمین یک گلیکوپروتئین انتقال دهنده مس، دارای زنجیره‌های اولیگوساکاریدی متعددی است که به اسید سیالیک ختم می‌شود.

✓ یکی از راه‌های نشاندار نمودن پروتئین‌های "مس" برای تخریب و حایگزینی در بدن، برداشت ریشه‌های اسید سیالیک توسط آنزیم سیالیداز می‌باشد. غشا پلاسمایی سلول‌های کبدی دارای ملکولهای لکتینی است که بطور اختصاصی به زنجیره‌های اولیگوساکاریدی حاوی ریشه‌های گالاکتوز متصل می‌گردد که دیگر فاقد ریشه اسید سیالیک انتهایی برای حفاظت می‌باشد. واکنش متقابل گیرنده - سرولوپلاسمین، سبب آغاز آندوسیتوز و تخریب سرولوپلاسمین می‌گردد. (مکانیسم مشابهی نیز در گلبولهای قرمز داریم)

✓ بعضی از هورمون‌های پپتیدی که در خون گردش می‌کنند، دارای بخش‌های اولیگوساکاریدی هستند که اثر قوی بر روی عمر آن‌ها در گردش خون دارند. هورمون تولید کننده جسم زرد و تیروتروپین دارای اولیگوساکاریدهایی با اتصال N هستند.

نکته: بخش کربوهیدراتی گلیکوپروتئین‌ها اثر قابل توجهی بر خصوصیات آن‌ها در زمان سنتز و بعد از آن دارد. به طور مثال ترکیب کالکسین که یک چاپرون در شبکه آندوپلاسمی می‌باشد با اتصال به گلوکز به تا شدن (Folding) مناسب گلیکوپروتئین‌ها نوع N کمک می‌کند. یا پروتئین‌های لیزوزومی از طریق مانوز ۶ فسفات وارد لیزوزوم می‌شوند. تولید مانوز ۶ فسفات نیاز به آنزیم N استیل گلوکز آمین فسفوترانسفراز دارد. کمبود این آنزیم می‌تواند منجر به بیماری سلول آنکلوزیون دار یا بیماری سلول I شود.

پروتئوگلیکان‌ها

از اجزاء بافت همبند هستند و قسمت اعظم آن را کربوهیدرات (تا ۹۵ درصد) تشکیل می‌دهد. بخش کربوهیدراتی پروتئوگلیکان‌ها را گلوکز آمینوگلیکان (GAG) تشکیل می‌دهد. GAGها جزو هتروپلی ساکاریدها هستند که راجع به آن‌ها صحبت شد. همانطور که در شکل زیر مشخص است نحوه اتصال GAGها به صورت کووالان به بخش پروتئینی برای تشکیل پروتئوگلیکان‌ها از طریق یک اتصال اولیگوساکاریدی صورت می‌گیرد. پروتئین از انتهای آمینو خود از طریق هیدروکسیل سرین (O- گلیکوزیدی) به بخش قندی که همان GAG است اتصال یافته است. قسمتی از GAG که وارد پیوند شده است رابط تتراساکاریدی Gal-Gal-Xyl است.

عمدتاً پیوند بهمین شکل است ولی در کراتان سولفات I پیوند N گلیکوزیدی بین N استیل گلوکز آمین و نیتروژن اسپارژین صورت می‌گیرد و در کراتان سولفات II پیوند O- گلیکوزیدی بین N استیل گالاکتوز آمین و گروه هیدروکسیل سرین یا ترئونین.

- ✓ دو خانواده مهم از پروتئوگلیکان‌های هیپران سولفات غشایی وجود دارد:
- (۱) **سیندگان‌ها** (داخل غشایی): دارای یک دومین گذرنده از غشا و یک دومین خارج سلولی حاوی ۳ تا ۵ زنجیره هیپران سولفات است.
- (۲) **گلیکان‌ها**: توسط یک لنگر لیپیدی (مشتقی از فسفاتیدیل اینوزیتول) به غشا متصل هستند.
- ✓ **پروتئین هسته ای سیندگان**: با وزن مولکولی ۵۶,۰۰۰ دارای یک دومین ترانس ممبران و یک دومین خارج سلولی حاوی سه زنجیر سولفات هیپران و دو زنجیر سولفات کندروایتین می‌باشد که هرکدام به یک ریشه Ser اتصال یافته اند. بخشهای هیپران سولفات به انواع مختلفی از لیگاندهای خارج سلولی اتصال یافته و به موجب آن واکنش متقابل بین لیگاند و گیرنده‌های اختصاصی موجود در سطح سلول را تعدیل می‌نمایند.
- ✓ بعضی از پروتئوگلیکان‌ها قادر به ایجاد تجمعات پروتئوگلیکانی هستند که خود همایش‌های متعدد سوپرامولکولی از تعداد زیادی پروتئین هسته ای می‌باشند که همگی به یک مولکول هیالورونات اتصال دارند.
- ✓ **شناخته شده ترین پروتئوگلیکان اگرکان است که در ماتریکس خارج سلولی بافت همبند وجود دارد.** پروتئین هسته ای اگرکان دارای زنجیره‌های متعدد کندروایتین سولفات و کراتان سولفات بوده که از طریق رابطهای سه قندی به ریشه سرین موجود در هسته پروتئینی اتصال یافته تا یک منومر اگرکان با وزن مولکولی حدود $10^6 \times 2$ حاصل گردد. وقتی یکصد یا تعداد زیادی از این هسته‌های پروتئینی آرایش یافته به یک مولکول امتداد یافته هیالورونات اتصال می‌یابند، تجمع پروتئوگلیکانی حاصل به همراه میزان آبی که آن را هیدراته نموده، حجمی در حدود یک سلول باکتری را اشغال می‌کند. اگرکان قویا با کلاژن خارج سلولی ماتریکس غروف واکنش متقابل داده و در تکامل آن و قدرت کششی آن نقش دارد.
- ✓ **پروتئین‌های فیبری ماتریکس، نظیر کلاژن، الاستین و فیبرونکتین، به این پروتئوگلیکان‌های خارج سلولی در هم پیچیده و ایجاد شبکه ای حاوی اتصال عرضی می‌نمایند که قدرت و انعطاف پذیری را به کل ماتریکس خارج سلولی می‌دهد.**
- ✓ **از اختلالات تجزیه پروتئوگلیکان‌ها (موکوپلی ساکاریدوز) می‌توان به بیماری هانتز به دلیل نقص در آنزیم ایدورونات سولفاتاز و اسلای به دلیل نقص در بتا گلوکورونیداز و هارلر به علت نقص در ال ایدورونیداز اشاره کرد.**
- ✓ بعضی از این پروتئین‌ها دارای جایگاههای اتصالی برای مولکولهای مختلف متعدد ماتریکس می‌باشند. برای مثال: **فیبرونکتین** دارای دومین‌های مجزایی برای اتصال **فیبرین، هیپارین سولفات، کلاژن و خانواده ای از پروتئین‌های غشاء پلاسمایی بنام اینتگرین‌ها** می‌باشند که پیامرسانی بین داخل سلول و ماتریکس خارج سلولی را وساطت می‌کنند.
- ✓ اینتگرین‌ها به نوبه خود دارای جایگاههای اتصالی برای تعداد زیادی از ماکرومولکولهای خارج سلولی می‌باشند سیمای واکنش‌های متقابل سلول-ماتریکس که ایجاد میگردد پروتئوگلیکان‌های ماتریکس برای پاسخ سلول‌ها به بعضی فاکتورهای رشد خارج سلولی ضروری هستند. برای مثال: فاکتور رشد فیبروپلاستی (FGF)، یک پیام پروتئینی خارج سلولی که تقسیم سلولی را تحریک می‌کند، ابتدا به بخشهای هیپران سولفات مولکولهای سیندگان در غشاء پلاسمایی سلول هدف اتصال می‌یابد. سپس سیندگان، FGF را به گیرنده پلاسمایی اختصاصی FGF ارائه داده‌و تنها بعد از آن FGF با گیرنده خود واکنش متقابل نموده و تقسیم سلولی را آغاز می‌نماید.

واکنش‌های متقابل اولیگوساکارید-لکتین، بسیاری از فرایندهای بیولوژیک را وساطت می‌نمایند:

لکتین‌ها در تمامی موجودات وجود دارند، پروتئین‌هایی هستند که تمایل و ویژگی بالایی برای اتصال به کربوهیدرات‌ها دارند. بعضی از عوامل ایجاد کننده پیوندهای هیدروژنی موجود در موقعیت‌های حیاتی دومن شناسایی کربوهیدراتی هر نوع پروتئین به اولیگوساکاریدهای اختصاصی اتصال می‌بندد و از اینرو، لکتین‌ها بسادگی بین قندهای بسیار مشابه تمایز قائل می‌شوند. لکتینها در انواع زیادی از فرایندهای شناسایی و چسبندگی سلول-سلول شرکت می‌نمایند.

✓ **سلکتین‌ها** خانواده ای از لکتین‌های موجود در غشا پلاسمایی می‌باشند که شناسایی و چسبندگی سلول-سلول را در دامنه وسیعی از فرایندهای سلولی وساطت می‌نمایند. یکی از فرایندها عبور سلول‌های ایمنی (لنفوسیت‌های T) از میان دیواره مویرگی، از خون به بافت‌ها و به محل‌های عفونت و التهاب می‌باشد.

✓ بعضی از میکروب‌های بیماریزا دارای لکتین‌هایی هستند که چسبندگی باکتری به سلول‌های میزبان و یا ورود سم به داخل سلول‌ها را وساطت می‌نمایند. باکتری که معتقدند مسئول اکثر زخم‌های معده می‌باشد، یعنی *Helicobacter pylori*، از طریق واکنش متقابل بین لکتین‌های غشا باکتری و اولیگوساکاریدهای اختصاصی گلیکوپروتئین‌های سلول‌های اپی تلیال معده، به سطح داخلی معده اتصال می‌یابد.