فصل اول:

مقدمه

۱-۱ مخمرها

مخمرها به عنوان قارچ های تک سلولی معرفی می شوند که عموماً از طریق عدم حضور هیف های کوئنوسیتیک[۱] شناخته می شوند. اصطلاح "مخمر" به نوبه ی خود هیچ معنای تاکسونومی ندارد و نمایان گر سازمان سلولی در برخی گروه های قارچی است. مخمرها شامل قارچ هایی با شکل جنسی (بازیدیومیستی و آسکومیستی) و غیر جنسی می‌باشند. مخمرهای بازیدیومیستی به گروه های هیمنومایست[۲] (قارچ های عالی[۳])، یوردینیومایسز[۴] (زنگ ها[۵]) ویوستیلاژینومایسز[۶] (سیاهک ها[۷]) تعلق دارند.

۱-۱-۱ تنوع و اکولوژی

مخمرها میکروارگانیسم هایی هستند که اغلب بخشی از فلور میکروبی اکوسیستم های طبیعی را تشکیل می‌دهند. این میکروارگانیسم ها در انواع محیط ها مانند خاک، دریاچه ها، تالاب ها و رودخانه ها یافت می‌شوند. این موجودات ساکنین طبیعی سطح گیاهان می باشند، با حیوانات در ارتباط هستند و در برخی زیستگاه های ساخته دست بشر مانند انواع غذاها نیز حضور دارند (Choudhary and Johri, 2009).

---

[۱] Coenocytic hyphae
[۲] Hymenomycetes
[۳] Mushroomforming Basidiomycetes
[۴] Urediniomycetes
[۵] Rusts
[۶] Ustilaginomycetes
[۷] Smuts

خصوصیات فیزیکوشیمیایی محیط زیست مانند دما، pH، فشار هوا، اشعه ماورائ بنفش، میزان شوری، فلور گیاهی و جانوری منطقه و غیره به عنوان عوامل اکولوژیکی داخلی و خارجی بر روی مخمر تاثیر دارند و تنوع، فعالیت متابولیکی، تولید انواع متابولیت های ارزشمند و رشد و بقای مخمر را تحت تاثیر قرار می دهند (Brandão, *et al*. 2010). آگاهی از مجموعه این عوامل در انتخاب شرایط مناسب به منظور غربالگری مخمرهایی با توانایی بیشتر در تولید متابولیت های ارزشمند مفید خواهد بود.

۱-۱-۲ اهمیت صنعتی

به طور کلی مخمرها به علت داشتن ویژگی هایی مانند نگه داری و کشت آسان، نیازهای محیطی و غذایی ساده تر نسبت به باکتری ها (جز در موارد خاص)، رسیدن به تراکم بالای سلولی با هزینه کم و در محیط کشت ساده، قابلیت انجام فرایندهای سلولی پس از ترجمه (که در تولید پروتئین های نوترکیب بسیار اهمیت دارد) و فقدان اندوتوکسین (بر خلاف باکتری ها) اهمیت فراوانی در صنعت دارند (Dominguez *et al*. 1998) (Evans 1996). مخمرها تولیدکنندگان اصلی محصولات بیوتکنولوژیک در سراسر دنیا می باشند و امروزه از نظر حجم تولید و جنبه های اقتصادی از سایر میکروارگانیسم های صنعتی پیشی گرفته اند. مخمرها در انواع زمینه های علمی، غذایی، پزشکی و کشاورزی اهمیت صنعتی فراوانی دارند. از کاربردهای سنتی و قدیمی مخمرها می توان به غذاهای تخمیری اشاره نمود و از کاربردهای جدید می توان تولید سوخت الکلی، پروتئین های تک سلولی[۸] و انواع متابولیت های ارزشمند نظیر کاروتنوئیدها را نام برد.

[۸] Single cell protein

امروزه جنس ها و گونه های زیادی از مخمرها شناسایی شده اند و این میزان رو به افزایش است (Deak 2009) گرچه فقط حدوداً ۱۲ عدد از آن ها در سطح صنعتی مورد استفاده قرار می گیرند و تقریباً ۷۰ تا ۸۰ گونه در سطح آزمایشگاهی برای بررسی توانایی آن ها جهت به کار برده شدن در صنعت مطالعه شده اند (Deak 2009). یکی از این گونه های مخمری، *Rhodotorula mucilaginosa* می باشد. این گونه که در خانواده مخمرهای بازیدیومیستی قرار دارد قادر به تولید رنگیزه های کاروتنوئیدی می باشد. این رنگیزه ها نه تنها به دلیل عملکرد بهعنوان پیش ساز ویتامین آترکیبات باارزشی محسوب می شوند، بلکه به دلیل خواص آنتی اکسیدانی و احتمالاً ضد توموری خود امروزه بسیار مورد توجه قرار گرفته اند (Johanson and Schroeder 1953).

۱-۱-۳ معرفی جنس *Rhodotorula*

Rhodotorula جنسی فراریخت[۹]است که در راسته ی یوستیناژینالس و زیر گروه یوردینومایسز قرار می‌گیرد. این جنس به وسیله ی کلنی های صورتی رنگ و جوانه های سلولی به همراه زخم جوانه ای باریک شناخته می شود (Choudhary *et al.* 2009).

تولید مثل: این موجودات معمولا سلول های کوچکی هستند که به وسیله ی جوانههای جانبی یا قطبی تولید مثل می کنند. در طول جوانه زنی، دیواره سلولی مادر متورم شده و به خارج برآمده گشته و تولید جوانه می‌کند. تولید مثل جنسی در این گروه دیده نشده است. برخی از سویه ها ممکن است مراحل آنامورفیک جنس های *Rhodosporidium*، *Leucosporidium* و برخی دیگر را به همراه دیواره عرضی ساده نشان دهند.

[۹] Anamorphic

ویژگی های رویشی : کلنی ها نارنجی، قرمز و یا زرد کم رنگند، از نظر قوام ممکن است کره ای تا مخاطی باشند. سلول های مخمری کروی، بیضوی، تخم مرغی کشیده اند و معمولا دارای جوانه اند. دیواره عرضی[۱۰] در آن ها شناخته نشده است. بالیستوکنیدیا[۱۱]در این گروه تشکیل نمی شود. هیف های واقعی و یا کاذب ممکن است تولید شوند.

ویژگی های فیزیولوژیکی : تخمیر در آنها وجود ندارد. عموماً، اما نه همه ی آن ها، توانایی جذب اینوزیتول را ندارند، گرچه هنگامی که اینوزیتول جذب می کنند، D- گلوکورونات را جذب نمی کنند. ترکیبات نشاسته مانند تولید نمی کنند. دی آزونیوم بلو ب (DBB) و واکنش اوره آز در این گروه مثبت است. کوآنزیم Q_9 و یا Q_{10} توسط این گروه تشکیل می شود. در طول هیدرولیز کامل سلولی گسیلور حضور ندارد (Barnett *et al.* 2000).

۱-۱-۴ معرفی گونه *Rhodotorula mucilaginosa*

این گونه پراکنش جهانی دارد و حتی در زیستگاه های آب شیرین و دریایی یافت می شود. این گونه از منابع انسانی به فراوانی جداسازی شده است، و یکی ازگونه های این جنس است که عفونت های انسانی ایجاد می‌کند (Harrison *et al.* 1998). چرخه جنسی در جنس *Rhorotorula* گزارش نشده است. تعداد زیادی از سویه های جداشده از محیط های دریایی به منظور مشاهده آمیزش جنسی در آن ها مورد بررسی قرار گرفتند و هیچ پاسخ مثبتی در آن ها دیده نشد (Harrison 1998). جدول ۱-۱ آزمون های جذب منابع مختلف و ویژگی های فنوتیپی برای گونه *R. mucilaginosa* را نشان می دهد.

[۱۰] Septal Pore
[۱۱] Blastoconidia

جدول ۱-۱ برخی ویژگی های فنوتیپی برای گونه ی *R.mucilaginosa* (Deak, et al. 2009)

ویژگی	نتیجه	ویژگی	نتیجه
Carbon assimilation Glucose	+	*N*-Acetyl-*D*-glucosamine	-
Galactose	V	Methanol	-
L-Sorbose	V	Ethanol	V
Sucrose	+	Glycerol	V
Maltose	V	Erythritol	-
Cellobiose	V	Ribitol	V
Trehalose	+	Galactitol	V
Lactose	-	D-Mannitol	V
Melibiose	-	D-Glucitol	V
Raffinose	+	α-Methyl-D-glucoside	V
Melezitose	V	Salicin	V
Inulin	-	D-Gluconate	+
Soluble starch	-	DL-Lactate	V
D-Xylose	+	Succinate	+
L-Arabinose	V	Citrate	V
D-Arabinose	V	Inositol	+
D-Ribose	V	Hexadecane	V
L-Rhamnose	V	Nitrate	-
D-Glucosamine	V	Vitamin-free	V
2-Keto-D-gluconate	-	10% NaCL/5% glucose	V
5-Keto-D-gluconate	-	Starch formation	-
Saccharate	-	Urease	+
D-Glucuronate	V	Gelatin liquefaction	-
Growth at 37°C	+	Thiamine-free	-
Fermentation	-	yeast extract agar 10% NaCL/5% glucose	V

+ مثبت، - منفی، V متغیر

۱-۲ متابولیت های ثانویه

متابولیت های اولیه شامل اسیدهای آمینه، قندهای ساده، اسیدهای نوکلئیک و لیپیدها برای فرایندهای سلولی ضروری هستند. متابولیت های ثانویه شامل ترکیبات تولید شده در پاسخ به تنش ها و شرایط محیط است (Keeling and Bohlmann 2006). متابولیت های ثانویه مولکول های آلی هستند که در رشد و نمو طبیعی یک ارگانیسم نقش ندارند، درحالی که متابولیت های اولیه دارای نقش

کلیدی در زنده ماندن گونه هستند. عدم وجود متابولیت های ثانویه منجر به مرگ فوری نمی شود اما در طولانی مدت سبب اختلال در بقای موجود زنده خواهد شد. این ترکیبات توسط گیاهان، حیوانات، جلبک ها، قارچ ها و باکتری ها سنتز می شوند و به دلیل تنوع شگفت انگیز درمشتقات ساختاری و عملکردی خود، بسیار مورد توجه هستند (Demain and Fang 2000). بسیاری از این متابولیت های ثانویه مانند ترپن ها، ترکیبات فنلی و آلکالوئیدها براساس منشا بیوسنتزی خود طبقه بندی می شوند (Jothi *et al.* 2008).

۱-۲-۱ ترپنوئیدها

دربین متابولیت های ثانویه متنوع، ترپن ها یکی از بزرگترین و متنوع ترین گروه را تشکیل می دهند (Breitmaier 2006). ترپن ها در اشکال شیمیایی متنوعی در یک آرایش غیرمعمول از هیدروکربن های خطی یا کایرال عاملی و یا اسکلت های کربوکسیلی با تغییرات شیمیایی متنوع مثل هیدروکسیل، کربونیل، کتون، آلدهید و گروه های پراکساید وجود دارند. ترپنهایی که از نظر عملکردی تغییر داده شده اند، عموماً به ترپنوئید ها یا ایزوپرنوئیدها ارجاع داده می شوند. تنوع بیشمار در ساختار این ترکیبات مسئول نقش های عملکردی متنوع آن هاست (Gershenzon and Dudareva 2007) (Harrewijin *et al.* 2001). بیش از ۵۵۰۰۰ نوع از ترپن ها جداشده اند، و این مقدار هر دهه تقریباً دو برابر می شود (McGarvey and Croteau 1995). برخی از نقش های عملکردی مشتقات ترپنوئیدی به عنوان هورمون ها (ژیبرلین ها)، رنگدانه های فتوسنتزی (فیتول، کاروتنوئیدها)، حاملین الکترون (یوبی کوئینون، پلاستوکوئینون)، میانجیهای اجتماع پلی ساکارید ها و هم چنین شرکت در ارتباطات و مکانیسم های دفاعی مشخص می شوند (Langenheim 1994). وزن مولکولی کم و ماهیت چربی دوست تعداد بی شماری از منوترپن ها و سکویی ترپن ها در ترکیب با تنوع بالای ساختار آنها و نیز فشار بخار بالای آنها در دمای معمول روزانه، برای نقش آن ها به عنوان

حاملین اطلاعات در نظر گرفته می شود. بسیاری دیگر ممکن است عملکرد مشخصی در مراحل بنیادین رشد و نمو و ایجاد ارگانیسم نداشته باشند (Williams *et al.* 1989) (Croteau *et al.* 2000).

۱-۲-۲ طبقه بندی ترپنوئیدها

ترپنوئیدها را می توان در چند گروه طبقه بندی نمود.

۱) همی ترپن ها:C_5، ۱ واحد ایزوپرن با ۵ اتم کربن

۲) مونوترپن ها:C_{10}، مانند ترکیبات دفاعی و روغن های ضروری

۳) سزکویی ترپن ها:C_{15}،مانند ABA، ترکیبات دفاعی، اسانس ها

۴) دی ترپن ها: C_{20}، مانند ژیبرلین، کلروفیل و تاکسول ها

۵) تری ترپن ها: C_{30}، مانند براسینواستروئیدها، استرول ها و ساپونین

۶) تتراترپن ها: C_{40}، مانند کاروتنوئیدها و استریگولاکتون ها

۷) پلی ترپن ها: مانند لاستیک، لاتکس و رزین ها

۱-۲-۳ بیوسنتز ترپنوئیدها

ترپنوئیدها در تمام موجودات زنده حضور دارند و از اسکلت ۵ کربنه ایزوپرن مشتق می شوند. ایزوپرنوئید های متنوع از تکرار متفاوت ایزوپرن ها به همراه واکنش های حلقوی شدن، بازآرایی و اکسیداسیون های بیشتر اسکلت کربنی ساخته می شوند (Sacchettini and Poulter 1997) (Dereth *et al.* 2006). "قانون بیوژنتیکی ایزوپرن[۱۲]" ابتدا درسال ۱۸۸۵ توسط Wallach تشخیص داده شد (Wallach 1885) و در سال های ۱۹۳۸ تا ۱۹۵۳ افزایش سر به دمی واحدهای فعال ۵ کربنه توسط Ruzicka نشان داده شد (Ruzicka 1938) (Ruzicka *et al.* 1953).

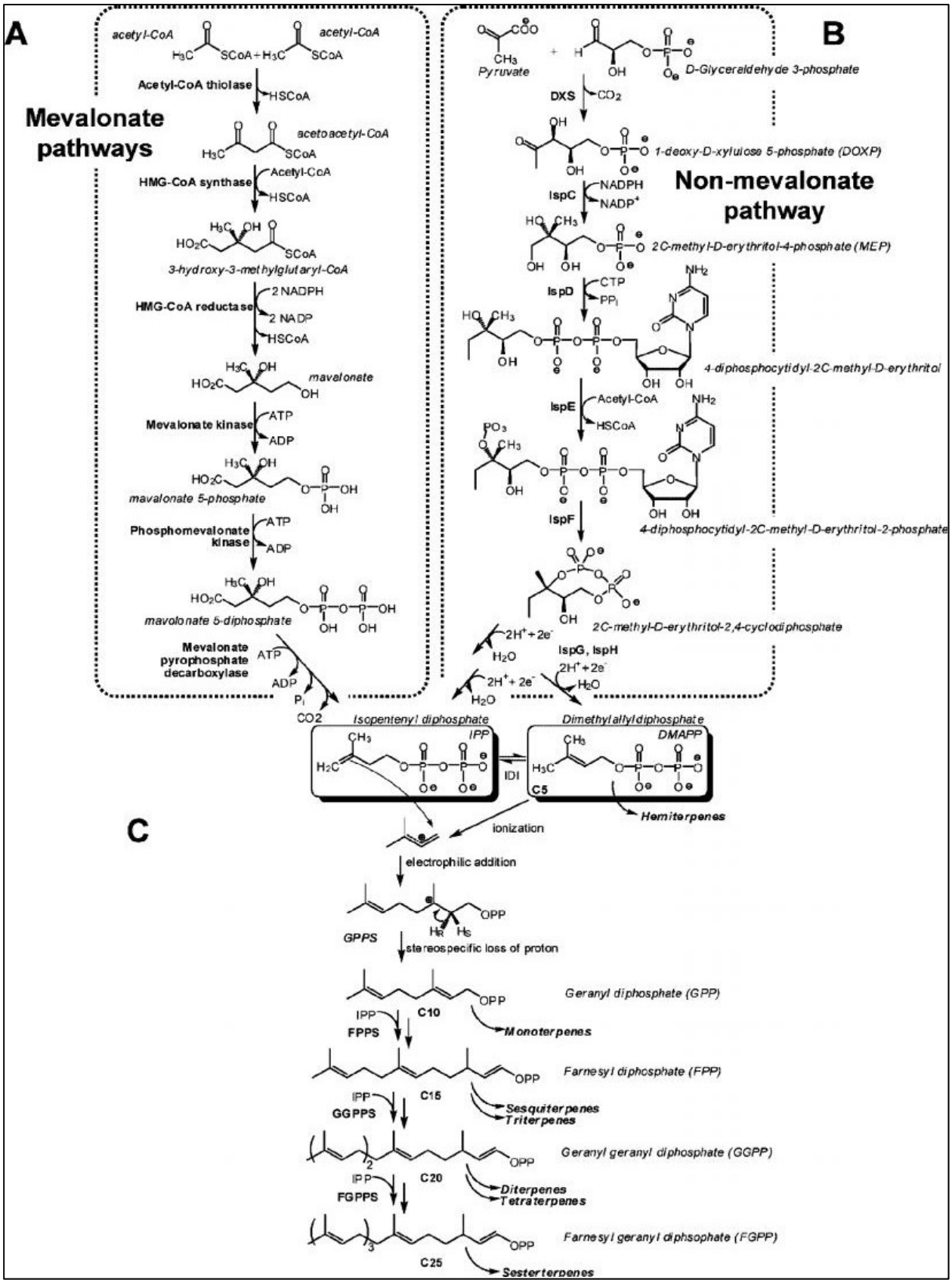
[۱۲] Biogenetic isoprene rule

در اوایل دهه ۱۹۵۰ استات (Little and Bloch 1950) و استیل کوآ(Lynen *et al.* 1951) به عنوان پیش ماده و هم چنین موالونیک اسید به عنوان یک حدواسط (Wolf *et al.* 195) و درنهایت ایزوپنتیل دی فسفات به عنوان واحد ۵ کربنه فعال بیوسنتزی سلولی (Chaykin *et al.* 1958) شناخته شدند.برای بیش از ۳ دهه این باور وجود داشت که تمام ایزوپرنوئیدهای سلول های زنده به وسیله مسیر استات/ موالونات ساخته می شوندو مسیر استات/ موالونات به عنوان تنها مسیر بیوسنتزی برای سنتزIPP[۱۳] محسوب می شد. در اوایل دهه ۱۹۹۰ با استفاده از علامت گذاری ^{13}C- گلوکز و اسپکتروسکوپی NMR با دقت بالا، دومین مسیر بیوشیمیایی کاملا غیروابسته و بدون نیاز به موالونات برای سنتز IPP، اولین بار در باکتری ها (Rohmer *et al.* 1993) و سپس در دیگر ارگانیسم های فتوسنتز کننده (که اکسیژن در آن درگیر است) مانند: جلبک های سبز (Lichtenthaler *et al.* 1995) (Schwender *et al.* 1995) (Schwender *et al.* 1996) و گیاهان عالی(Lichtenthaler *et al.* 1997) (Lichtenthaler *et al.* 1997) (Arigoni *et al.* 1997) شناخته شد. مسیر غیروابسته به موالونات به نام های مسیرDOXP[۱۴] و یاMEP[۱۵]نیز شناخته می شوند. ارگانیسم های هتروتروف مانند آرکی آ، قارچ ها و جانوران فاقد مسیر DOXP/MEP جهت سنتز IPP می باشند، این موجودات IPP و ایزوپرنوئیدهای مورد نیاز خود را ار طریق مسیر استات/ موالونات سنتز می کنند. بخش بزرگی از باکتری ها دارای مسیر DOXP/MEP بوده، گرچه تعداد اندک دیگر دارای مسیر موالونات می باشند و تعداد کمی از استرپتومایسزها دارای هردو مسیر می‌باشند (Boucher *et al.* 2000).

[۱۳] Isopentenyl-Diphosphate
[۱۴] 1-Deoxy-D-xylulose-5-Phosphate
[۱۵] 1-Deoxy-D-xylulose-5-Phosphate

گیاهان عالی به همراه کلروپلاست خود که از اجداد درون زیست سیانوباکتر مشتق شده اند دارای مسیر DOXP/MEP جهت سنتز کاروتنوئیدها در پلاستیدها و مسیر موالونات در سیتوسل به منظور سنتز استرول ها می باشند. این امر برای برخی از گروه های جلبک ها نیز صادق است (Lichtenthaler 1999) (Disch *et al.* 1998). هردو مسیر منجر به تشکیل واحدهای ۵ کربنه ایزوپنتنیل دی فسفات و ایزومر آن، دی متیل الیل دی فسفات، خواهد شد که واحدهای ساختمانی اصلی در سنتز ترپن ها به شمار می آیند. در هر دو جایگاه سنتزی، از زمان شروع با پیش سازهای IPP و DAMP[۱۶]، هزاران آنزیم در مسیرهای بیوسنتزی برای طویل سازی زنجیره ترپنوئیدها، حلقوی کردن و افزودن گروه های عاملی به زنجیره هیدروکربنی برای تولید تنوع های ساختاری و شیمیایی بی شمار شرکت می کنند که دراین بین تنها چندصد عدد از آنها با جزئیات بررسی شده‌اند. یک گروه از آنزیم ها که پرنیل ترانسفرازنیز خوانده می شوند سنتز پرنیل دی فسفات های خطی نظیر ژرانیل دی فسفات، فارنسیل دی فسفات وفارنسیل ژرانیل دی فسفات، ژرانیل ژرانیل دی فسفات را برعهده دارند. در نهایت ژرانیل ژرانیل دی فسفات به عنوان پیش ساز دی ترپن ها و تتراترپن ها قرار می‌گیرد.دانش حاضر از مراحل آنزیمی- بیوشیمیایی هر دو مسیر در شکل ۱-۱ نشان داده شده است.

[۱۶] Dimethylallyl-diphosphate



شکل ۱-۱ تصویر شماتیک از مسیر های بیوسنتزی ترپنوئیدها (Lichtenthaler 1999)

۱-۲-۳-۱ مسیر موالونات

این مسیر از هفت واکنش آنزیمی برای تبدیل پیش ماده استیل کوآ به IPP و DMAPP استفاده می کند(شکل ۱A-۱) مرحله تنظیمی در این مسیر HMG-CoA ردوکتاز است. اولین واکنش زیستی آنزیمی توسط آنزیم استواستیل کوآ تیولاز انجام می شود، این واکنش توسط فعالیت آنزیم دیگری به نام HMG-CoA سنتاز به منظور تشکیل HMG-CoA[۱۷] ادامه می یابد. سپس با استفاده از دو مول NADPH توسط آنزیم HMG-CoA ردوکتاز، مشتقات HMG-CoA تبدیل به موالونیک اسید می شود. به طور متعاقب، موالونیک اسید تحت فسفریلاسیون وابسته به ATP قرار می گیرد و در نهایت توسط دو آنزیم موالونات کیناز و فسفوموالونات کیناز منجر به تولید موالونات ۵-دی فسفات می گردد که این ترکیب نیز در آخر به طریق واکنش کاتالیز شده توسط آنزیم موالونات دی فسفات دکربوکسی لاز تولید اولین واحد بیوژنیک ایزوپرن، IPP را می کند (Kazuyama 2002).

[۱۷] 3-(S)-Hydroxy-3-methylglutaryl-CoA

۱-۲-۳-۲ مسیر غیر موالونات

مسیر شناخته شده غیر موالونات یا MEP شامل ۸ واکنش آنزیمی است که توسط ۹ آنزیم کاتالیز می‌شود (شکل۱B-۱). ۷ عدد از این آنزیم هااز نظر ساختاری شناسایی شده است و مکانیسم های احتمالی فعالیت آن ها پیشنهاد شده است (Kazuyama 2002). واکنش اولیه برای سنتز IPP از پیروات و گلیسرالدهید- ۳- فسفات شروع می شود ودرنهایت آنزیمDOXP- سنتاز با استفاده از تیامین پیروفسفات به عنوان کوفاکتور منجر به تولید DOXP می شود . سپس آنزیم DOXP- ردوکتوایزومرآز با استفاده از ۱ مول NADPH، DOXP را به MEP تبدیل می کند (Mac Sweeney *et al.* 2005) (Proteau 2004).واکنش بعدی در این مسیر برهم کنش ۱مولکول CTP با MEP است که منجر به تولید CDP-ME[۱۸]شده و دراین حین فسفات آزاد می شود. در مرحله بعدی، واکنش توسط آنزیم وابسته به ATP، CDP-ME کیناز،ADP وCDP-ME2P[۱۹]تولید می شود. پنجمین مرحله از این مسیر توسط آنزیم MECPP- سنتاز انجام می شود و در آن پیش ماده CDP-ME2P تبدیل به MECPP[۲۰]می گردد. دو مرحله بعدی در این مسیر کمتر شناخته شده است و توسط آنزیم هایHMBPP[۲۱] سنتاز و HMBPP ردوکتاز کاتالیز می شوند. مرحله ی تنظیمی در این مسیر آنزیمDOXP- ردوکتوایزومرآز است (Puan et al. 2005) (Grawert *et al.* 2004). آخرین آنزیم IDI[۲۲]است که تبدیل IPP را به ایزومر آن DAMPP کاتالیز می کند.

---

[۱۸] CDP-Methyl-D-erythritol
[۱۹] CDP-Methyl-D-erythritol-2-phosphate
[۲۰] 2-C-Methyl-D-erythritol-2,4-cyclo-diphosphate
[۲۱] 4-Hydroxy-3-methyl-2-(E)-butenyl-diphosphate
[۲۲] Isopentenyl-Diphosphate Isomerase

۱-۳کاروتنوئیدها

کاروتنوئیدها رنگدانه های آلی هستند که به طور طبیعی در کلروپلاست گیاهان و برخی دیگر از ارگانیسم های فتوسنتز کننده مانند جلبک ها، برخی از انواع باکتری ها و قارچ هایی مانند مخمرها حضور دارند. برخی از جنس های مخمری که دارای این ترکیبات می باشند عبارت اند از: *Rhordosporidium, Sporobolomyces , Sporidium, Rhodotorula, Sporobolomyces* و *Phaffia* (Frengova and Beshkova 2009).

۱-۳-۱ ساختار، نام گذاری و طبقه بندی

کاروتنوئید ها در طول قرن نوزدهم کشف شدند. Wachen در سال ۱۸۳۱ اصطلاح "کاروتن" را برای کریستال های رنگیزه های هیدروکربنی حاصل از ریشه هویج پیشنهاد کرد. Berzelius رنگیزه های زرد با قطبیت بیشتر استخراج شده از برگ های پاییزی را "گزانتوفیل" نامید و Tswett به وسیله کروماتوگرافی ستونی رنگیزه های زیادی را جداسازی کرد و کل گروه را "کاروتنوئید" نامید (Yahia and Ornelas-Paz 2010). بیش از ۶۰۰ نوع کاروتنوئید مختلف از منابع طبیعی استخراج و شناسایی شده اند.

ویژگی های فیزیکی و فعالیت های طبیعی و عملکردهای کاروتنوئیدها به وسیله خصوصیات شیمیایی آن ها مشخص می شود و این ویژگی ها به وسیله ساختار مولکولی آن ها تعریف می گردد. کاروتنوئیدها از ۴۰ اتم کربن (تتراترپن ها) به همراه پیوند های دوگانه متناوب تشکیل شده اند. این ترکیبات از ۸ واحد ایزوپرنوئید تشکیل شده اند که به گونه ای آرایش یافته اند که واحدهای ایزوپرنوئید در مرکز مولکول معکوس می شوند. این مولکول ها می توانند غیر حلقوی یا حلقوی (تک -، دو- یا آریل) باشند. یک ویژگی مشخص این مولکول ها وجود پیوندهای دوگانه ی متوالی و گسترده در آن هاست که به عنوان یک کروموفور جاذب نور عمل می کنند و مسئول رنگ های زرد، قرمز و نارنجی

است که این ترکیبات به حاملین خود می دهند (Rodringuez-Amaya 1999). کاروتنوئیدها به صورت متداول به دو گروه تقسیم می شوند؛ کاروتن ها (کاروتنوئیدهای هیدروکربنی) و گزانتوفیل ها (کاروتنوئیدهای اکسیژن دار).

کاروتنوئیدها عموماً در فرم پایدارترایزومریک all-*trans* خود وجود دارند گرچه مقادیر اندک از ایزومرهای *cis* به طور طبیعی یا حاصل از تغییرات ایجاد شده در فرم ایزومری all-*trans* نیز وجود دارند. به طور سنتی، به کاروتنوئیدها اسامی عام - که از منابع استخراج بیولوژیکی آن ها منشا گرفته است- داده شده است. گرچه یک طرح نیمه سیستماتیکی پیشنهاد شده است که این امکان را می دهد تا کاروتنوئیدها به دور از ابهام و به گونه ای که ساختار آنان نیز تعریف گردد، نام گذاری شوند. سیستم جدید برای نام گذاری کاروتنوئیدها توسط کمیسیون نام گذاری بیوشیمیایی در سال ۱۹۷۱ به چاپ رسید. نام نیمه سیستماتیکی و رسمی کاروتنوئیدها بر پایه ریشه " کاروتن" است که به دنبال پیشوندهای حروف یونانی، که دو گروه انتهایی را معین می کند، می آید.

قابل ذکر است که این پیشوندها براساس ترتیب الفبایی خود قرار می گیرند. برای مثال، بتا-کاروتن به شکل صحیح بتا،بتا-کاروتن و آلفا-کاروتن به عنوان بتا، آلفا-کاروتن نشان داده می شود. اسامی عام و نیمه سیستماتیکی برخی از متداول ترین کاروتنوئیدها در جدول ۱-۲ نشان داده شده است (Rodringuez-Amaya 1999).

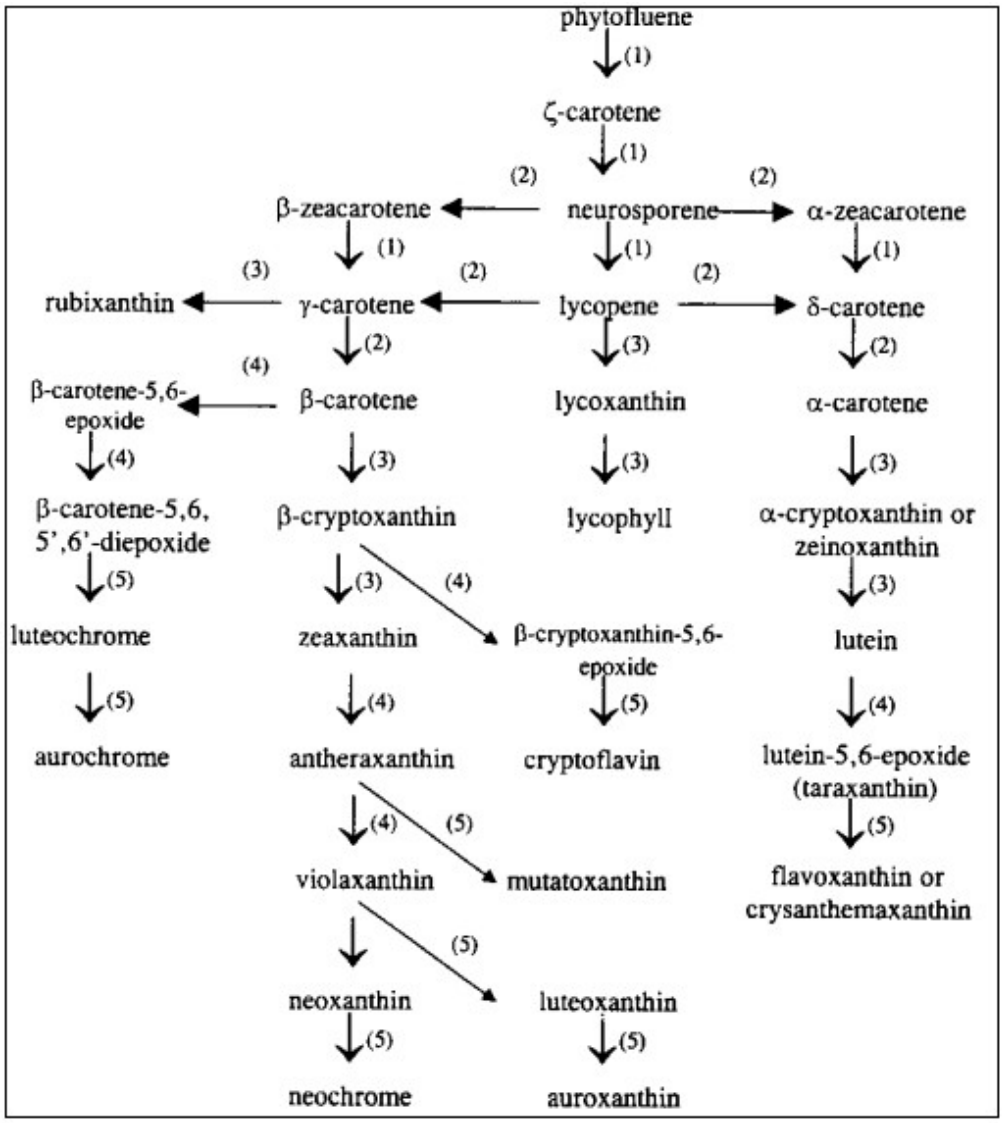
جدول ۱-۲ اسامی عام و نیمه سیستماتیکی برخی از متداول ترین کاروتنوئیدها (Rodringuez-Amaya 1999)

Trivial name	Semisystematic name
Antheraxanthin	5,6-epoxy-5,6-dihydro-β,β-carotene-3,3′-diol
Astaxanthin	3,3′-dihydroxy-β,β-carotene-4,4′-dione
Auroxanthin	5,8,5′,8′-diepoxy-5,8,5′,8′-tetrahydro-β,β-carotene-3,3′-diol
Bixin	methyl hydrogen 9′-*cis*-6,6′-diapocarotene-6,6′-dioate
Canthaxanthin	β,β-carotene-4,4′-dione
Capsanthin	3,3′-dihydroxy-β,κ-caroten-6′-one
Capsorubin	3,3′-dihydroxy-κ,κ-carotene-6,6′-dione
α-Carotene	β,ε-carotene
β-Carotene	β,β-carotene
β-Carotene-5,6-epoxide	5,6-epoxy-5,6-dihydro-β,β-carotene
β-Carotene-5,8-epoxide (mutatochrome)	5,8-epoxy-5,8-dihydro-β,β-carotene
β-Carotene-5,6,5′,6′-diepoxide	5,6,5′,6′-diepoxy-5,6,5′,6′-tetrahydro-β,β-carotene
δ-Carotene	ε,ψ-carotene
γ-Carotene	β,ψ-carotene
ζ-Carotene	7,8,7′,8′-tetrahydro-ψ,ψ-carotene
Crocetin	8,8′-diapocarotene-8,8′-dioic acid
α-Cryptoxanthin	β,ε-caroten-3′-ol
β-Cryptoxanthin	β,β-caroten-3-ol
Echinenone	β,β-caroten-4-one
Lutein	β,ε-carotene-3,3′-diol
Lutein-5,6-epoxide (taraxanthin)	5,6-epoxy-5,6-dihydro-β,ε-carotene-3,3′-diol
Lycopene	ψ,ψ-carotene
Neoxanthin	5′,6′-epoxy-6,7-didehydro-5,6,5′,6′-tetrahydro-β,β-carotene-3,5,3′-triol
Neurosporene	7,8-dihydro-ψ,ψ-carotene
Phytoene	7,8,11,12,7′,8′,11′12′-octahydro-ψ,ψ-carotene
Phytofluene	7,8,11,12,7′,8′-hexahydro-ψ,ψ-carotene
Rubixanthin	β,ψ-caroten-3-ol
Violaxanthin	5,6,5′,6′-diepoxy-5,6,5′,6′-tetrahydro-β,β-carotene-3,3′-diol
α-Zeacarotene	7′,8′-dihydro-ε,ψ-carotene
β-Zeacarotene	7′,8′-dihydro-β,ψ-carotene
Zeaxanthin	β,β-carotene-3,3′-diol
Zeinoxanthin	β,ε-carotene-3-ol

۱-۳-۲ بیوسنتز

همان طور که قبلاً نیز ذکر شد، سنتز واحد ۵ کربنه فعال (IPP) برای بیوسنتز تتراترپن هایی نظیر کاروتنوئیدها در ارگانیسم های هتروتروف مانند آرکی آ، قارچ ها (مخمرها) و جانوران از طریق مسیر استات/ موالونات صورت می گیرد. در نهایت اتصال این واحدها به هم سبب طویل شدن زنجیره و تولید توالی های $C_{۱۰}$، $C_{۱۵}$، $C_{۲۰}$. می کند. دایمر شدن توالی $C_{۲۰}$، اولین ترکیب ۴۰ کربنه یعنی فیتوئن

را تولید میکند. شکل ۱-۲ مراحل تولید کاروتنوئیدهای مختلف و تغییرات محتمل در این مراحل را به طور خلاصه نشان می دهد (Rodringuez-Amaya 1999).



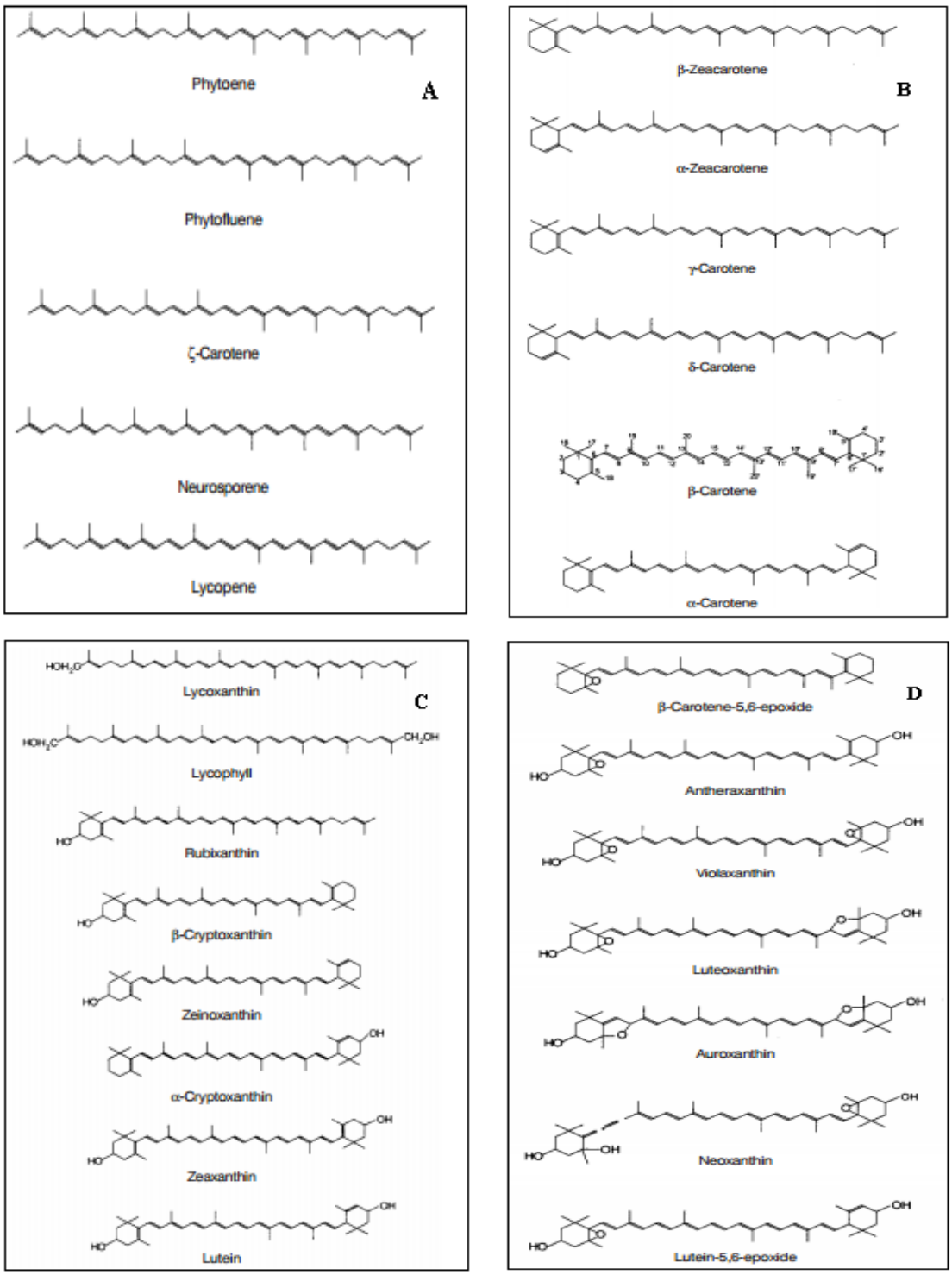
شکل ۱-۲ مراحل انتهایی بیوسنتز کاروتنوئیدها و تغییرات محتمل در آن ها. واکنش ها: ۱) غیراشباع سازی ۲) حلقوی شدن۳) هیدروکسیلاسیون ۴) تغییرات آپوکساید و فرانوکساید(Rodringuez-Amaya 1999).

ایجاد پیوندهای دوگانه در جایگاه های متناوب فیتوئن[۲۳] (با سه پیوند متناوب دوگانه) آن را تبدیل به فیتوفلوئن[۲۴] (با ۵ پیوند متناوب دوگانه) می نماید. تکرار واکنش غیراشباع سازی[۲۵] سبب تبدیل فیتوفلوئن به ζ-کاروتن[۲۶] (با ۷پیوند متناوب دوگانه) و این ترکیب به نورورسپورن[۲۷] (با ۹ پیوند متناوب

دوگانه) و در نهایت به لیکوپن با (۱۱ پیوند متناوب دوگانه) می گردد. به وسیله فرایند حلقوی شدن یک انتهای مولکول مسیر بیوسنتز شاخه دار شده و سبب تشکیل کاروتن های تک حلقه بتا-زئاکاروتن[۲۸] در یک سو و آلفا- زئاکاروتن در سوی دیگر می گردد. این مولکول ها به نوبه خود تحت تاثیر واکنش غیر اشباع سازی، به ترتیب سبب تولید گاما- کاروتن[۲۹] و دلتا-کاروتن[۳۰] می شوند. مولکول های حاصل به وسیله فرایند حلقوی شدن به ترتیب تولید کاروتن های دو حلقه ایبتا-کاروتن و آلفا-کاروتن را می نمایند. هیدروکسیلاسیون منجر به تولید روبیگزآنتین[۳۱] (مونوهیدروکسی) از گاما-کاروتن و لیکوگزآنتین[۳۲] (مونوهیدروکسی) و لیکوفیل[۳۳](دی هیدروکسی) از لیکوپن می شود. افزودن یک گروه هیدروکسیل به بتا-کاروتن منجر به تشکیل بتا-کریپتوگزآنتین[۳۴] و افزودن دومین گروه سبب تولید زئاگزآنتین[۳۵]می گردد. مشابه این تغییرات در آلفا-کاروتن سبب تولید آلفا-کریپتوگزآنتین یا زینوگزآنتین[۳۶] مونوهیدراته و لوتئین دی هیدراته می شود. آپوکسیدار کردن بتا-کاروتن، بتا-کریپتوگزآنتین، زئاگزآنتین و لوتئینسبب تشکیل آپوکسی کاروتنوئیدهای بسیاری می گردد (Rodringuez-Amaya 1999). شکل ۱-۳ برخی از کاروتنوئیدهای مهم را نشان می دهد.

---

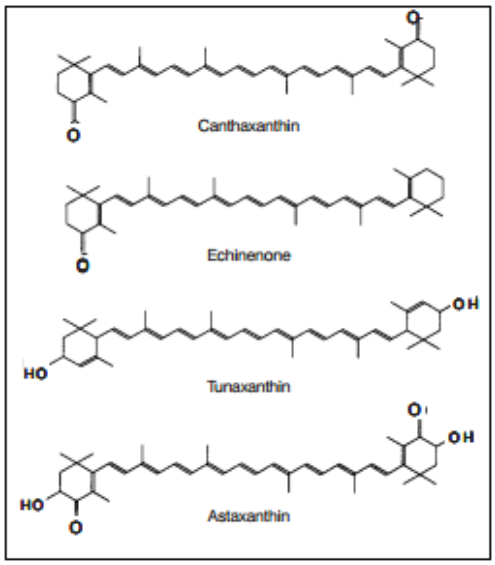
[۲۳] Phytoene
[۲۴] Phytofluene
[۲۵] desaturation
[۲۶] ζ-carotene
[۲۷] Neurosporene
[۲۸] β-zeacarotene
[۲۹] γ-carotene
[۳۰] δ-carotene
[۳۱] Rubixanthin
[۳۲] Lycoxanthin
[۳۳] Lycophyll
[۳۴] β- cryptoxanthin
[۳۵] Zeaxznthin
[۳۶] Zeinoxanthin



شکل ۱-۳ انواعی از کاروتنوئیدها به همراه ساختار باز آن ها. A. کاروتنوئیدهای خطی، B. کاروتنوئیدهای تک-حلقه ای، C. کاروتنول ها (هیدروکسی کاروتنوئیدها) ، D. آپوکسی کاروتنوئیدها(Rodringuez-Amaya 1999).

۱-۳-۳ کاروتنوئیدهای خاص

وجود کاروتنوئیدهای خاص و غیرمعمول نیز گزارش شده است. مهمترین مثال غالب برای این ترکیبات کپسآنتین[۳۷] و کپسوربین[۳۸] است که رنگدانه های غالب در فلفل قرمز هستند. از دیگر مثال های کلاسیک کاروتنوئیدهای یکتا، بیگزین[۳۹] ، رنگیزه اصلی چاشنی غذا آناتو و کروستین[۴۰] ترکیب رنگی زعفران هستند (Rodringuez-Amaya1999). ساختار باز این ترکیبات در شکل ۱-۴ آورده شده است.



شکل ۱-۴ ساختار ۴ کاروتنوئید خاص(Rodringuez-Amaya 1999)

۱-۳-۴ ویژگی های فیزیکی و شیمیایی

یکی از ویژگی های مهم ساختار کاروتنوئیدها سیستم بلند و متناوب پیوندهای دوگانه و یگانه است که بخش مرکزی مولکول را می سازد. این امر یک سیستم کانژوگه را می سازد که در آن الکترون های π به طور کارآمدی در سراسر طول زنجیره پلیئن قرار گرفته است. این صفت به کاروتنوئیدها شکل مولکولی، فعالیت شیمیایی و ویژگی های نوری خاص می بخشد.

---

[۳۷] capsanthin

[۳۸] capsorubin

[۳۹] bixin

[۴۰] crocetin